
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3906T001 - Mechatronika

**Měření viskozity kapalin piezoelektrickým
bimorfem**

**Liquid viscosity measurements with
piezoelectric bimorph cantilever**

Diplomová práce

Autor:	Miroslav Kučera
Vedoucí práce:	Doc.Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
Konzultant:	Doc.Ing.Pavel Rydlo, Ph.D.

V Liberci 15. 5. 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra fyziky

Školní rok: 2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Miroslava Kučeru**

Studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 3906T001 - Mechatronika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Měření viskozity kapalin piezoelektrickým bimorfem**

Zásady pro vypracování:

1. Viskozní kapalina, její vlastnosti a metody měření viskozity
2. Piezoelektrický bimorf a jeho vlastnosti
3. Sestavení experimentálního zařízení a rezonanční měření parametrů piezoelektrických bimorfů
4. Měření viskozity různých kapalin piezoelektrickým bimorfem a jeho optimalizace vzhledem k rozměrům a tvaru

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah průvodní zprávy: cca 40 až 50 stran

Seznam odborné literatury:

- [1] J.Erhart: Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika Elektro 11 (2002) 4-7
- [2] P.Půlpán, J.Erhart: Parametry piezoelektrických bimorfů, Elektro 3 (2002) 4-7
- [3] J.G.Smits, A.Ballato: Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Cantilever Bimorphs, J.Microelectromech. Syst. 3, 3 (1994) 105-112
- [4] W.Y.Shih, X.Li, H.Gu, W.-H. Shih, I.A.Aksay: Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers, J.Appl.Phys. 89, 2 (2001) 1497-1505
- [5] J.Brož a kol.: Základy fyzikálních měření I., SPN Praha 1967, “Měření viskozity“, str. 135-140

Vedoucí diplomové práce: Doc.Mgr. Jiří Erhart, Ph.D. (katedra fyziky, FP TUL)
Konzultant: Doc.Ing.Pavel Rydlo, Ph.D.

Zadání diplomové práce: 31. 10. 2006
Termín odevzdání diplomové práce: 18. 5. 2007

L.S.

.....

Vedoucí katedry

.....

Děkan

V Liberci dne 31.10.2006

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomohli se zdárným dokončením diplomové práce. Zvláštní dík patří Doc.Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D., který mě pečlivě a ochotně vedl při realizaci této diplomové práce. Další dík patří Mgr. Milanu Čmelíkovi, který poskytl pomůcky a zařízení ke zjištění hustoty a viskozity testovaných kapalin. Dále bych pak chtěl poděkovat Ing. Lence Martinové, CSc., která poskytla testované roztoky a umožnila jejich přípravu. A v neposlední řadě děkuji Doc.Mgr. Lidmile Burianové, CSc. za umožnění měření vlastností piezoelektrických bimorfů v laboratoři pro piezoelektrický výzkum na katedře fyziky Technické univerzity v Liberci.

Anotace

Hlavním cílem této práce je měření viskozity různých kapalin piezoelektrickým bimorfem. Tato metoda je založena na útlumu kmitů objektu ponořeného do měřené kapaliny. Čím je kapalina viskóznější, tím větší je útlum kmitů. K uskutečnění tohoto experimentu vedla snaha přesně určit viskozitu roztoků PVA, u nichž je právě viskozita důležitým faktorem pro tvorbu nanovláken. Ze získaných výsledků vyplývá, že tato metoda měření poskytuje jen orientační hodnoty viskozit, přičemž přesnost výsledku je značně závislá na rozměrech piezoelektrického bimorfu.

Abstract

The main goal of this thesis is the viscosity measurements of the different liquids with piezoelectric bimorph cantilever. This method is based on vibration damping of entity immersed in liquid. The more is the liquid viscous, the more is the vibration damped. Presented experiment was motivated by the precise viscosity measurement of PVA solutions. Viscosity is crucial factor for nanofiber's electrospinning from such PVA solutions. The obtained results indicate that this method gives only approximative values of viscosity. Accuracy of results depends on the bimorph cantilever dimensions in large extent.

Obsah:

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotace	5
Abstract	5
Úvod	9
1.1 Struktura a vlastnosti kapalin	10
2.1 Viskozita kapalin	11
2.2 Popis viskózního chování kapaliny	12
2.3 Vliv teploty a tlaku na viskozitu kapalin	14
2.4 Rozlišení na dva základní typy viskózních kapalin	14
2.5 Odvození vztahů pro dynamickou viskozitu	16
3.1 Metody měření viskozity kapalin	19
3.1.1 Tělískové viskozimetry	19
3.1.2 Rotační viskozimetry	20
3.1.3 Kapilární viskozimetry	22
3.1.4 Výtokové viskozimetry	23
3.1.5 Vibrační viskozimetry	23
4.1 Piezoelektrický jev a jeho využití	24
5.1 Piezoelektrická keramika	26
5.1.1 Struktura PZT	26
5.1.2 Stavový diagram PZT	27
5.1.3 Vlastnosti PZT keramiky	29
6.1 Rozdělení piezoelektrických struktur	31
7.1 Piezoelektrický bimorf a jeho vlastnosti	33
7.1.1 Chování bimorfu v elektrickém poli	34
7.1.2 Parametry piezoelektrických bimorfů	34
8.1 Určení viskozity kapalin piezoelektrickým unimorfem	36
8.1.1 Popis a sestavení měřicího zařízení	36
8.1.2 Teoretická analýza	38
9.1 Sestavení experimentálního zařízení pro měření rezonančních parametrů piezoelektrických bimorfů	43
9.1.1 Návrh a realizace měřicího zařízení	43
9.1.2 Měřené typy piezoelektrických bimorfů a jejich parametry	45
9.1.3 Měření parametrů piezoelektrických bimorfů a jejich ověření matematickým výpočtem	48
10.1 Příprava a měření parametrů testovaných roztoků	51
10.1.1 Ověření koncentrace roztoku PVA	51
10.1.2 Příprava různých koncentrací roztoku PVA	52
10.1.3 Měření parametrů testovaných roztoků	53
11.1 Měření viskozity různých kapalin piezoelektrickým bimorfem	57
11.1.1 Princip měření viskozity piezoelektrickým bimorfem zčásti ponořeným do zkoumané kapaliny	57
11.1.2 Princip určení viskozity kapalin z naměřených dat	58
11.1.3 Ověření teoretické analýzy	59
12.1 Diskuze získaných výsledků	63
Závěr	65
Seznam odborné literatury:	67
Přílohy	68

Seznam použitých symbolů

τ - tečné napětí
 dv/dy - gradient rychlosti
 η - dynamická viskozita
 ν - kinematická viskozita
 ρ - hustota kapaliny
 T - termodynamická teplota
 A, B - empirické konstanty
 D - gradient rychlosti
 τ_k - meze toku (kluzu)
 V - objem kapaliny
 t - čas
 Δp - úbytek tlaku
 L - délka
 R - poloměr
 $\rho h g$ - hydrostatický tlakový rozdíl
 ρ_k - hustota koule
 F' - tíhová síla
 v_m - mezní rychlost
 P_i - poloha
 Δt - doba průchodu kuličky mezi senzory polohy v části dráhy
 ω - úhlová rychlost
 r_1 - poloměr zvonu
 r_2 - poloměr válcové nádoby
 φ - původní poloha
 K - direktivní konstanta torzního vlákna
 T - doba torzních kyvů
 J - moment setrvačnosti torzně kmitající sestavy
 r - poloměr kapiláry
 l - délka kapiláry
 ρ_x, ρ_0 - hustoty
 Δt_x - doba výtoku měřené kapaliny
 Δt_0 - doba výtoku destilované vody
 F_R, F_T - feroelektrický stav
 P_c - paraelektrický stav
 MPB - morphotropní fázová hranice
 F_{T-} - tetragonální fáze
 F_R - romboedrická fáze
 $s_{\lambda\mu}$ - elastický koeficient elektromechanických vlastností
 $d_{i\mu}$ - piezoelektrický koeficient elektromechanických vlastností
 ε_{ij} - dielektrický koeficient elektromechanických vlastností
 T_λ - mechanické napětí
 E_i - elektrické pole
 S_λ - mechanická deformace
 D_i - indukce elektrického pole

s_{11}^E - elastická poddajnost kolmo na polarizaci
 d_{31} - piezoelektrický koeficient kolmo na polarizaci
 L – volná délka bimorfu
 w – šířka piezokeramické vrstvy
 h – tloušťka piezokeramické vrstvy
 δ – výchylka, délka vlny kapaliny
 f_r – rezonanční frekvence
 $F_0 e^{-i\omega t}$ – vnější harmonická síla
 ω – úhlová frekvence
 M_e – efektivní hmota na konci tyčinky
 K – efektivní ohybová konstanta na konci tyčinky
 MI – indukovaná hmota
 b – brzdící koeficient
 b_{in} – vlastní tlumící koeficient tyčinky
 ρ_p - hustota PZT vrstvy
 h_p - tloušťka PZT vrstvy
 L_p - délka PZT vrstvy
 ρ_s - hustota ocelového plátku
 h_s - tloušťka ocelového plátku
 L_s - délka ocelového plátku
 w – šířka unimorfu
 D_p - ohybový modul PZT/ ocelové vrstvy
 E_p, E_s - Youngův modul pružnosti PZT /ocelové vrstvy
 n_i - vlastní číslo (eigenvalue)
 y_0 - axiální amplituda
 tp – tloušťka piezoelektrické vrstvy
 tk – tloušťka kovové vrstvy
 tn – neutrální vlákno
 r – poloměr zakřivení při ohybu
PVA – polyvinylalkohol
 D – průměr kuličky
 R – poloměr kmitající kuličky
 L_p – ponořená délka bimorfu
 γ – šířka peaku fáze v jeho polovině výšky

Úvod

Účelem této práce je snaha zdokonalit, zjednodušit a urychlit současné metody měření viskozity kapalin. V současnosti je očekáván velký příslib od piezoelektrických materiálů, proto byla zvolena metoda měření viskozity kapalin, popisovaná v této práci, založená také na tomto principu. Z větší části se jedná tedy o experiment, který by měl potvrdit teoretické předpoklady. V prvních částech práce jsou nastíněny vlastnosti a viskózní chování určitých kapalin, poté je vysvětlen piezoelektrický jev a materiály související s tímto jevem. Hlavní část práce se zabývá samotným experimentem, spočívajícím v kmitání piezoelektrického bimorfu částečně ponořeného do viskózní kapaliny.

Mechanické kmity (tj. jejich amplituda a fáze) jsou ovlivněny odporovou silou při pohybu bimorfu v kapalině, což se projevuje díky piezoelektrickému jevu na jeho impedanci. Vyhodnocením elektrických parametrů bimorfu tak lze získat informaci o viskozitě kapaliny.

Pro studium viskozity jsme zvolili sadu roztoků kapalin newtonovského chování i kapaliny s dlouhými polymerními řetězci nenewtonovského charakteru. Zkoumané vzorky roztoků polyvinylalkoholu (PVA) jsou důležitou surovinou pro přípravu nanovláken pomocí metody elektrosponingu. Co nejpřesnější určení viskozity je důležitým předpokladem úspěchu při přípravě vhodného roztoku pro výrobu nanovláken.

1.1 Struktura a vlastnosti kapalin

U kapalin jsou molekuly látky blízko u sebe. Je mezi nimi tudíž velmi málo volného prostoru. Mezi molekulami v kapalném skupenství působí přitažlivé síly, proto kapaliny zaujmou jen určitý objem (molekuly kapaliny zůstávají ve vzájemné blízkosti, aby přitažlivé síly minimalizovaly celkovou energii soustavy). Schopnost tekutin téci a měnit svůj objem souvisí s jejich mikroskopickou strukturou. Molekuly se mohou v kapalném skupenství volně navzájem pohybovat, proto kapaliny mohou téci a zaujmout tvar libovolné nádoby.



Obr. 1.1. Schopnost kapalin zaujmout libovolný tvar

Přitažlivé síly mezi molekulami kapalin patří do kategorie slabých, van der Waalsových interakcí, tedy interakcí dipol – dipol, interakcí ion – dipol a disperzních sil.

Kapaliny vykazují řadu specifických vlastností, jako jsou například povrchové napětí, kapilární akce (kapilární elevace nebo deprese) a viskozita.

2.1 Viskozita kapalin

V každé proudící kapalině existuje **vnitřní tření**, které je důsledkem existence smykových napětí v reálné kapalině. Vnitřní tření proudící kapaliny charakterizujeme veličinou, které říkáme **viskozita**.

Viskozita je vlastnost, která se projeví pouze při pohybu kapaliny. Charakterizuje schopnost kapaliny téci, resp. vyjadřuje odpor kapaliny k pohybu (tečení). Např. tlustá vrstva medu se podstatně více brání roztékání než stejně tlustá vrstva vody. Proto říkáme, že med je viskóznější než voda.

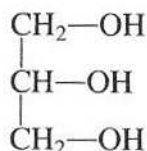


Obr 2.1.1. Rozdíl viskozity medu a vody

Viskozita kapalin je analogická smykovému tření mezi pevnými tělesy: Při viskózním proudění se kinetická energie přeměňuje na teplo podobně jako při vzájemném pohybu těles za působení tření – vymizí-li tření, těleso může klouzat po vodorovné ploše stálou rychlostí. Podobně na těleso, které se pohybuje v neviskózní kapalině, nepůsobí žádná brzdicí síla viskózního charakteru (Britský vědec lord Rayleigh poznamenal, že v ideální kapalině lodní šroub nebude pracovat, ale na druhé straně loď jednou uvedená do pohybu nebude lodní šroub potřebovat).

Viskozita je důsledkem mezimolekulárních sil mezi molekulami kapaliny. Kapaliny, u nichž se vyskytují silné mezimolekulární síly, mají vyšší viskozitu než kapaliny s nižšími mezimolekulárními silami. Na viskozitě se projeví i struktura molekul. Extrémně vysokou viskozitu vykazuje např. glycerol.

Glycerol má tři OH skupiny (obr 2.1.2), každá molekula glycerolu může tvořit tři vodíkové vazby s jinými molekulami glycerolu. Vzhledem k prostorovému uspořádání molekul glycerolu jsou pak vodíkovými vazbami svázané molekuly jakoby zaklesnuté do sebe a nejeví tendenci sklouznout jedna po druhé, jak je to potřeba při toku kapaliny.

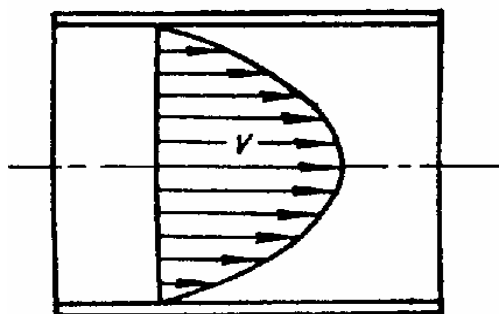


Obr 2.1.2. Molekula glycerolu [14]

Viskozita rozhoduje především o tvaru proudového pole, o silách, kterými kapalina působí na stěny nádoby a též o přestupu tepla v kapalině (konvektivní přenos tepla).

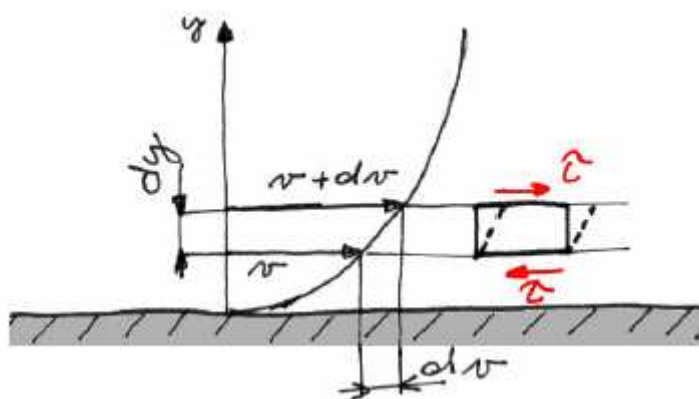
2.2 Popis viskózního chování kapaliny

Představme si proudící reálnou kapalinu rozdělenou na velmi mnoho vrstev rovnoběžných se směrem proudění. Jednotlivé vrstvy se vůči sobě mohou pohybovat různou rychlostí. Nejpomaleji se bude pohybovat vrstva v těsném styku se stěnou trubice, jíž kapalina protéká. Tato vrstva pak bude zpomalovat sousední vrstvu, která se bude pohybovat o něco rychleji než krajní vrstva. Nejméně zpomalena bude vrstva ve středu trubice, která se bude pohybovat nejrychleji (obr 2.2.1).



Obr 2.2.1. Profil pole rychlostí v proudící kapalině v trubici [13]

Tečné napětí, které je kompenzováno proměnnou rychlostí kapaliny, je tím větší, čím více se mění rychlost od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti, kterou bychom pozorovali při postupu od vrstvy k vrstvě kolmo ke směru proudění (obr.2.2.2), můžeme charakterizovat podílem dv/dy - gradientem rychlosti ve směru kolmém k proudu.



Obr. 2.2.2. Změna rychlosti mezi vrstvami kapaliny

Při tzv. laminárním proudění, při němž probíhají proudová vlákna souběžně a kapalina se nepromíchává, je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti dv/dy :

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

Konstanta úměrnosti η je závislá na povaze tekutiny a říkáme jí koeficient vnitřního tření nebo též **dynamická viskozita**.

$$\eta = \tau \frac{dy}{dv} \quad \left[\text{Pa} \cdot \text{s} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \quad (2.2)$$

Vedle dynamické viskozity se můžeme v praxi setkat s veličinou **kinematická viskozita**, která je definovaná jako poměr dynamické viskozity η a hustoty kapaliny ρ .

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (2.3)$$

Kinematickou viskozitu je výhodné užívat při popisu dějů závisících jak na viskozitě tak na hustotě, např. při popisu hydrodynamiky kapalin.

2.3 Vliv teploty a tlaku na viskozitu kapalin

Viskozita kapalin závisí na teplotě a tlaku. S rostoucí teplotou klesá, s rostoucím tlakem vzrůstá. Vliv tlaku je však většinou zanedbatelný kromě tlaků velmi vysokých. Závislost viskozity na teplotě při stálém tlaku můžeme popsat vztahem:

$$\eta = \exp \left(A + \frac{B}{T} \right) \quad (2.4)$$

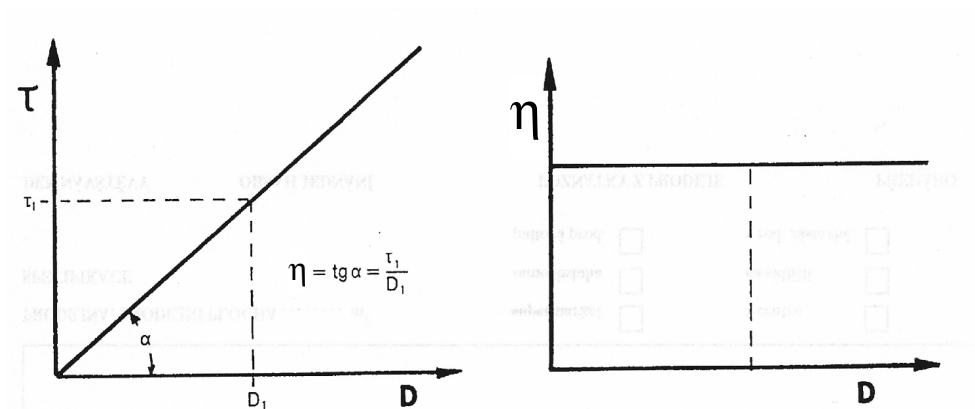
kde T je termodynamická teplota v K a A , B jsou empirické konstanty [13]

2.4 Rozlišení na dva základní typy viskózních kapalin

- a) Newtonovské - Dynamická viskozita je konstantní (př. voda a ostatní běžné kapaliny).

Newtonovské kapaliny jsou zpravidla nízkomolekulární látky. Viskozita těchto tekutin nezávisí na vazkém napětí a jejich toková křivka je znázorněna na obr.

2.4.1. Platí $\eta = \tan \alpha$. D je zde vyjádřením gradientu rychlosti ($D = dv/dy$).



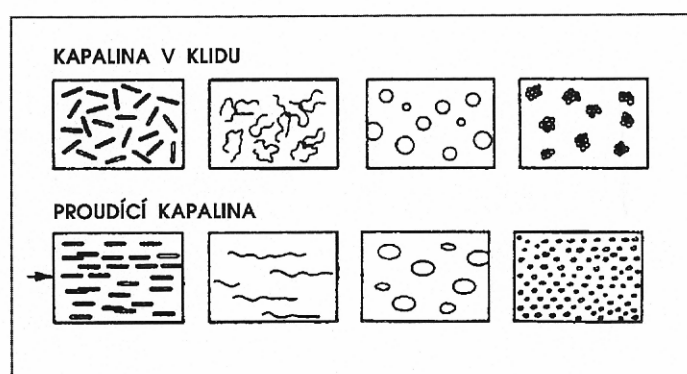
Obr.2.4.1. Toková a viskozitní křivka newtonovské kapaliny

- b) **neNewtonovské** – Viskozita není konstantní, je závislá na tečném napětí nebo na změně rychlosti ve směru kolmém na směr rychlosti. (př. hydrosměsi, krev, tečení plastů, řezná maziva)

Platí pro ně analogicky s Newtonovým zákonem rovnice:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2.5)$$

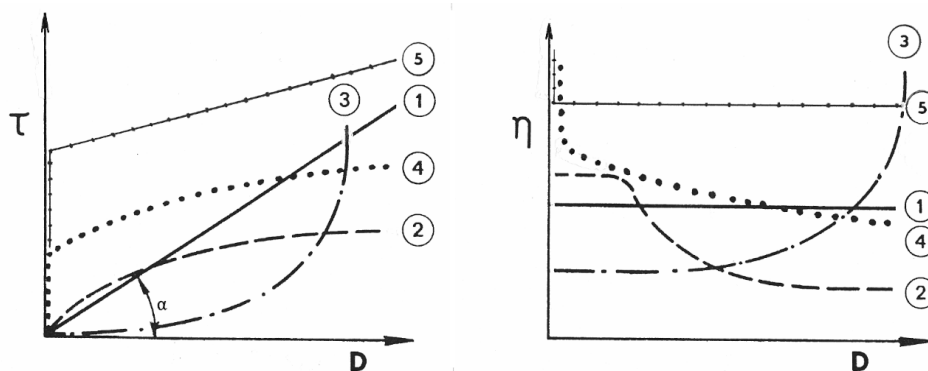
kde η je ovšem tzv. **zdánlivá viskozita**, která není látkovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí. Některé příčiny jsou schematicky znázorněny na obr. 2.4.2.



Obr. 2.4.2. Vliv toku na uspořádání částic v neNewtonské kapalině

K charakterizaci toku neNewtonských kapalin je proto nutno znát průběh závislosti $\eta = \eta(D)$ v širším intervalu D .

Mezi základní typy neNewtonovských kapalin patří např. pseudoplastické kapaliny a strukturně viskózní kapaliny, jejichž zdánlivá viskozita se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje. Dilatantní kapaliny, jejichž zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti a v neposlední řadě plastické a binghamské kapaliny, což jsou kapaliny u nichž dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. **meze toku (kluzu) τ_k** . (obr. 2.4.3)



Obr. 2.4.3. Tokové a viskozitní charakteristiky některých neNewtonských kapalin

1- newtonská kapalina 2- strukturně viskózní kapalina

3- dilatantní kapalina

4- plastická kapalina (pseudoplastická s mezí toku) 5- binghamská kapalina

2.5 Odvození vztahů pro dynamickou viskozitu

a) Poiseuilleův vztah

Proudí-li newtonská kapalina malou rychlostí úzkou trubicí, je rozložení vektoru rychlosti v osovému řezu parabolické a proudění je laminární. Za těchto podmínek odvodil Poiseuille vztah mezi objemem V kapaliny (o dynamické viskozitě η) proteklým trubicí za čas t a úbytkem tlaku Δp na délce L trubice o poloměru R [13]:

$$V = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{L} t \quad (2.6)$$

Proudí-li kapalina hustoty ρ kapilárou délky L účinkem vlastního hydrostatického tlaku, lze tlakový úbytek Δp , odpovídající vnitřnímu tření v kapalině, určit

z hydrostatického tlakového rozdílu $\rho h g$, zmenšeného o kinetickou energii objemové jednotky v ústí kapiláry, podle Bernoulliovy rovnice:

$$\Delta p = \rho h g - \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \quad (2.7)$$

kde střední rychlost proudění je:

$$\bar{v} = V / (\pi R^2 t) \quad (2.8)$$

Z toho pak pro dynamickou viskozitu odvodíme vztah [13]:

$$\eta = \rho \frac{\pi R^4}{8 V L} h g t - \frac{\rho V}{16 \pi L} \frac{1}{t} \quad (2.9)$$

b) Stokesův vzorec

Při pohybu tělesa v kapalině klade kapalina jeho pohybu odpor, který je při pomalém proudění přímo úměrný rychlosti. Pro odpor, který klade kapalina o viskozitě η pohybu koule o poloměru r , odvodil Stokes z pohybové rovnice nestlačitelné kapaliny s vnitřním třením vztah [13]:

$$F = 6 \pi \eta r v \quad (2.10)$$

který platí pro nepříliš velké rychlosti v pohybu koule, při nichž je obtékání laminární. Padá-li koule hustoty ρ_k v kapalině hustoty $\rho < \rho_k$, působí na ni tíhová síla zmenšená o vztlak, tedy síla:

$$F' = m g - V \rho g = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_k - \rho) g \quad (2.11)$$

která ji z počátku zrychluje. Proti ní však působí síla odporu F tím větší, čím větší je rychlost v . Rychlost v bude teoreticky vzrůstat, až dosáhne jisté maximální hodnoty v_m , tzv. mezní rychlosti, při níž bude $F = F'$ a další pohyb koule bude rovnoměrný. Mezní rychlost je tedy dána podmínkou:

$$6 \pi \eta r v_m = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_k - \rho) g \quad (2.12)$$

ze které můžeme vypočítat dynamickou viskozitu kapaliny [13]:

$$\eta = \frac{2}{9} g (\rho_k - \rho) \frac{r^2}{v_m} . \quad (2.13)$$

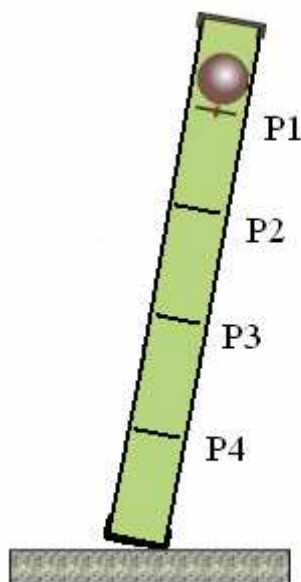
3.1 Metody měření viskozity kapalin

Pro měření viskozity se používá široká řada měřicích přístrojů. Podle způsobu měření viskozity je můžeme rozdělit do několika základních skupin. Jsou to tělískové, rotační, kapilární, plováčkové, výtokové a vibrační viskozimetry.

Viskozita je silně závislá na teplotě, je tedy nutné, aby přístroje a senzory pro měření viskozity pracovali během měření za konstantní teploty.

3.1.1 Tělískové viskozimetry

Tyto přístroje (tělískové, kuličkové, Stokesovy, Höpplerovy) vycházejí z měření mezních rychlostí v_m a doby průchodu kuličky mezi senzory polohy při volném pádu měřenou kapalinou. Jak je vidět na obrázku obr. 3.1.1, používá se více senzorů pro určení polohy P_i , jelikož je nutné zjistit, zda už bylo dosaženo mezní rychlosti kuličky.



Obr. 3.1.1. Höpplerův viskozimetr [12]

Jelikož se jedná o volný pád tělesa v kapalině, můžeme zde použít vztah odvozený podle Stokese a viskozitu spočítat jako:

$$\eta = \frac{2}{9} g (\rho_k - \rho) \frac{r^2}{v_m} . \quad (3.1)$$

Kde můžeme zavést konstantu: $K = \frac{2r^2 g}{9v_m}$, což je tzv. konstanta kuličky udávaná výrobcem. (3.2)

Výsledný vztah pro určení viskozity se nám pak zjednoduší do tvaru:

$$\eta = \Delta t K (\rho_k - \rho) \quad (3.3)$$

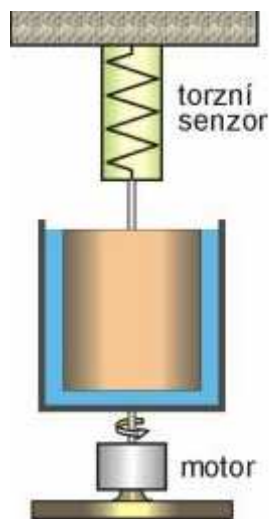
kde Δt je doba průchodu kuličky mezi senzory polohy v části dráhy, kde již bylo dosaženo mezní rychlosti v_m .

3.1.2 Rotační viskozimetry

Rotační viskozimetry jsou založeny na měření torzní síly, kterou působí rotující kapalina na element zavěšený na torzním vlákně. Typické provedení viskozimetru se skládá ze zvonu o poloměru r_1 ponořeného do měřené kapaliny ve válcové nádobě o poloměru r_2 . (obr.3.1.2)

Nádoba se otáčí konstantní úhlovou rychlostí ω , vnitřním třením kapaliny je otáčivý moment přenášen na druhý element (zvon), zavěšený na torzním vlákně.

Na tomto elementu můžeme změřit úhel pootočení od původní polohy φ , který je úměrný úhlové rychlosti ω a viskozitě kapaliny.



Obr. 3.1.2. Válcový rotační viskozimetr [12]

Dynamická viskozita se určí ze vztahu:

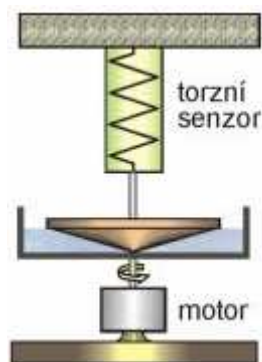
$$\eta = \frac{K\varphi}{4\pi h\omega} \frac{1}{r_1^2 - r_2^2} \quad (3.4)$$

kde K je direktivní konstanta torzního vlákna. Určíme ji nejlépe z doby torzních kyvů T sestavy zavěšené na vlákně, tedy ze vztahu:

$$K = \frac{\pi^2}{T^2} J \quad (3.5)$$

kde J je moment setrvačnosti torzně kmitající sestavy.

Pro měření extrémně viskózních směsí, jako jsou například nevulkanizované kaučukové směsi, rotační metodou se používají místo válců kužely s různými vrcholovými úhly (obr. 3.1.3).

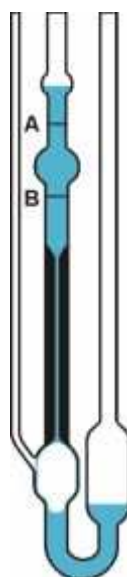


Obr. 3.1.3. Kuželový rotační viskozimetr [12]

3.1.3 Kapilární viskozimetry

Princip měření viskozity spočívá v tom, že je udržována stálá rychlost průtoku škrtícím orgánem, nejčastěji kapilárou a měří se rozdíl tlaků před a za kapilárou jako veličina úměrná viskozitě. Využívají Poiseuillovu rovnici pro průtok kapaliny kapilárou o poloměru r a délce l .

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p \cdot \tau}{8 V \cdot \ell} \quad (3.6)$$



Obr. 3.1.4. Kapilární viskozimetr [12]

3.1.4 Výtokové viskozimetry

Tyto přístroje (Englerův, Redwoodův, Sayboltův) využívají Hagen- Poiseuillova zákona a měří dobu výtoku kapaliny kruhovou kapilárou. Určují relativní viskozitu a to tak, že se porovnává doba výtoku měřené kapaliny Δt_x s dobou výtoku destilované vody Δt_0 (při teplotě 20 °C). Předpokládá se znalost hustot ρ_x a ρ_0 .

Dynamická viskozita se tedy určí ze vztahu:

$$\eta = \frac{\rho_x}{\rho_0} \frac{\Delta t_x}{\Delta t_0} \eta_0 \quad (3.7)$$

Hodnota dynamické viskozity pro vodu je $\eta_0 = 1,002 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$.

Pro příliš viskózní kapaliny tato metoda selhává, protože nejde o výtok otvorem, nýbrž o statické oddělování kapek. V tomto případě je například možné zvětšit průměr výtokového otvoru.

3.1.5 Vibrační viskozimetry

Tyto viskozimetry převádějí měření viskozity na určování poklesu amplitudy kmitů objektu ponořeného do měřené kapaliny. Objekt je elektromagneticky rozkmitáván a z údajů senzoru amplitudy kmitů objektu se určuje koeficient útlumu kmitů. Útlum závisí také na hustotě kapaliny. Ta musí být během měření stálá, musíme se tedy vyvarovat vlivu teplot. Jinými slovy: teplota měřené kapaliny a objektu musí být během měření konstantní.

4.1 Piezoelektrický jev a jeho využití

Piezoelektrický jev spočívá v tom, že deformací (tlakem, ale také tahem, ohybem nebo krutem) vhodně vybroušených krystalů určitých látek vzniká elektrický náboj, čímž na dvou protilehlých stranách krystalu pozorujeme vznik elektrického napětí. Jedná se v podstatě o polarizaci látky tlakem. Tento jev bývá označován jako přímý piezoelektrický jev. Naopak při přivedení napětí na dvě protilehlé strany krystalu dochází k deformacím. Tento jev se nazývá nepřímý piezoelektrický jev. Tato závislost je stejně tak lineární jako u přímého piezoelektrického jevu. Při přivedení střídavého napětí se krystal může rozkmitat. Velikost a směr deformace závisí na polaritě a na velikosti přivedeného napětí (obr. 4.1).

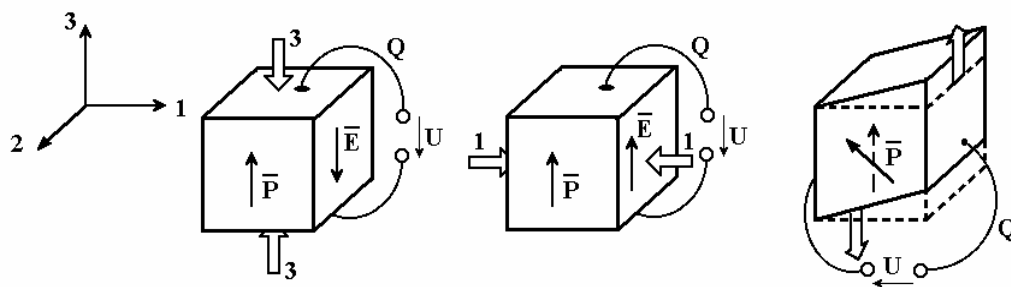
Tento jev byl objeven bratry Pierrem a Jacquesem Curieovými již v roce 1880 na krystalech turmalinu. Ti tehdy zjistili, že mechanickým namáháním krystalu turmalinu vzniká na jeho povrchu náboj, který je přímo úměrný velikosti mechanického napětí [1].

V roce 1921 byla objevena další třída materiálů, které jsou označovány jako feroelektrické. Feroelektrické uspořádání znamená, že v materiálu spontánně vznikají elektrické dipólové momenty, které lze elektrickým polem uspořádat do jednoho směru a látka potom jeví feroelektrické vlastnosti. Všechny feroelektrické látky jsou současně i piezoelektrické a mají vesměs velkou permitivitu.

V průmyslu našel tento jev uplatnění až v polovině 20. století vlivem rychle se rozvíjejícího vývoje minimalizace kondenzátorů. Vývoj dále pokračoval, byly zkoumány další a další materiály. Dnes mezi ně patří především piezoelektrické keramiky (zvláště pro jejich výborné materiálové parametry a příznivou cenu) a dokonce i organické látky nebo polymery [1].

V současné době existuje řada odvětví, kde se můžeme s tímto jevem setkat. Ať už v řadě oborů elektrotechniky (automatizační technika, radioelektronika a telekomunikační technika – rezonátory, filtry a zpožďovací linky- televizní, rozhlasová a výpočetní technika), tak v optice, automobilové a spotřební elektronice.

Piezoelektrické prvky mohou vysílat a přijímat i neslyšitelný ultrazvuk, například v ultrazvukových defektoskopech ke zjišťování skrytých vad materiálu nebo v medicíně (ultrazvukové zobrazování lidského plodu, ultrazvukové mikromasáže, likvidace ledvinových a žlučnickových kamenů).



4.1. Podélný, příčný a střižový piezoelektrický jev – tlusté šipky ukazují směr deformace

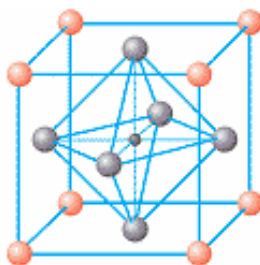
5.1 Piezoelektrická keramika

Piezoelektrická keramika – PZT keramika je v současné době široce rozšířeným materiálem využívajícím piezoelektrického jevu. Je to především pro její dobré materiálové vlastnosti a příznivou cenu. Díky feroelektrickým vlastnostem, které zaručují také její piezoelektrické vlastnosti, může PZT sloužit k přímému převodu el. energie na mechanickou a naopak [1].

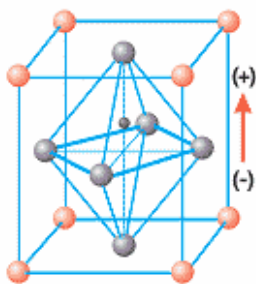
5.1.1 Struktura PZT

Tvoří ji nejčastěji materiály na bázi tuhých roztoků oxidů olova, zirkonu a titanu, tj. zirkoničitan olovnatý PbZrO_3 (PZ) a titaničitan olovnatý PbTiO_3 (PT), nejčastěji ve složeních $x = 48\text{--}52\%$ PZ. V menší míře se také piezoelektrická keramika vyrábí z BaTiO_3 , $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, PbNb_2O_6 , popř. z PMN-PT.

Základní buňka PZT má perovskitovou strukturu nad Curieovou teplotou (obr. 5.1.1). Nad touto teplotou keramika nevykazuje piezoelektrické vlastnosti, protože krystalická mřížka má střed souměrnosti. Má tedy kubickou symetrii. Při teplotě nižší, než je Curieova, dochází k vychýlení centrálního iontu ze středu symetrie a tím ke vzniku elementárního dipólu, čímž se materiál stává feroelektrickým, tedy také piezoelektrickým. V tomto stavu je buňka v tetragonální, popř. romboedrické fázi (obr. 5.1.2) .



Obr. 5.1.1. Perovskitová struktura nad Curieovou teplotou - v polohách červených modelů atomů jsou umístěny atomy Pb^{2+} , v polohách modrých modelů jsou atomy O^{2-} a uprostřed se střídají atomy Zr^{4+} a Ti^{4+} .



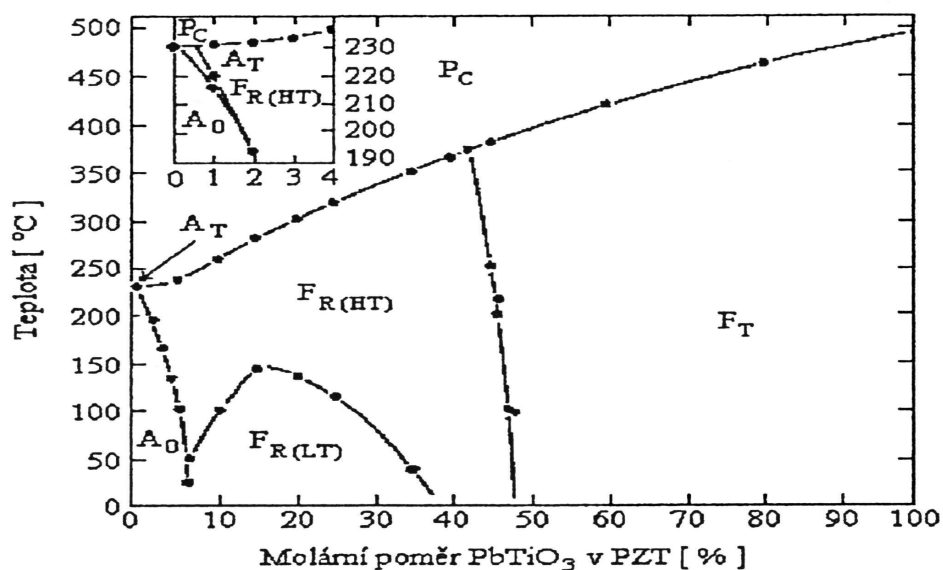
Obr. 5.1.2. Perovskitová struktura pod Curieovou teplotou – můžeme si všimnout vychýlení středu symetrie, čímž vzniká elementární dipól.

Přesto, že došlo ke vzniku těchto dipólů, nejeví se keramika jako celek piezoelektrická. Je to z toho důvodu, že vzniklé dipóly jsou různě orientované a tvoří tzv. domény s různou orientací. Proto je nutné keramiku zpolarizovat vnějším elektrickým polem, abychom určili těmto doménám stejný směr orientace.

Některé materiálové vlastnosti PZT keramik lze ovlivňovat malým množstvím dopujících příměsí. Řada z těchto vlastností může být však konkurenční, tzn. že příznivé ovlivnění jedné vlastnosti může mít nepříznivý vliv pro vlastnost jinou. K těmto příměsím patří např. atomy lanthanu (La), ale také atomy Nb, Sr, Fe, Mn, Cr, U.

5.1.2 Stavový diagram PZT

Jak už bylo řečeno, krystalová struktura PZT je ovlivněna zastoupením atomů Zr^{4+} a Ti^{4+} . Procentuální poměr zirkoničitanu olovnatého $PbZrO_3$ (PZ) a titaničitanu olovnatého $PbTiO_3$ (PT) v celkové struktuře $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PZT) má vliv na stav a fáze krystalu. Další vlastností, která ovlivňuje stavy keramiky je teplota. Závislosti teploty a procentuálního zastoupení PZ a PT můžeme vidět na obr. 5.1.3.



Obr. 5.1.3. Stavový diagram systému PZT [1]

Na obrázku je vidět, jak se mění stav feroelektrický F_R , F_T na stav paraelektrický P_C . Tato hranice je ovlivněna procentuálním zastoupením PZ a PT v keramice a teplotou. Čím větší je poměr PZ vůči PT, tím více narůstá teplota pro přechod z jednoho stavu do druhého. Tato teplota, která se také říká Curieova teplota, je významným parametrem pro použití PZT keramiky. Po překročení této teploty zanikají feroelektrické vlastnosti látek, a tudíž i piezoelektrický jev.

Přibližně kolem 48 % koncentrace PZ se nachází tzv. Morfotropní fázová hranice (MPB). Tato hranice odděluje feroelektrický stav s tetragonální fází F_T a feroelektrický stav s romboedrickou fází F_R . To znamená, že stejné složení PZT keramiky umožňuje existenci stejné fáze materiálu pro široký teplotní obor a není se tedy potřeba obávat fázových přechodů měnících symetrii materiálu a tím i jeho vlastností. Výhodné je, že právě na této hranici vznikají nejlepší materiálové vlastnosti. Tato oblast se vykazuje existencí nejvíce směrů polarizace, a tudíž nejlepšími polarizačními vlastnostmi.

5.1.3 Vlastnosti PZT keramiky

Vlastnosti zpolarizované PZT keramiky ovlivňují její materiálové koeficienty elektromechanických vlastností. Tyto koeficienty (elastické s , piezoelektrické d a dielektrické ε) jsou anizotropní, tj. mají různé hodnoty v různých směrech. Jejich tenzorové složky lze díky symetrii zjednodušeně zapsat v maticovém tvaru.

Elastická matice koeficientů:

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{pmatrix}$$

Piezoelektrická matice koeficientů:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Kde koeficient d_{31} souvisí s deformací kolmo na směr polarizace (využití především pro ploché disky) a koeficient d_{33} s deformací ve směru polarizace (využití pro tyčinky, dlouhé a podélné tyčinky).

Dielektrická matice koeficientů:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}$$

Vztahy mezi mechanickým napětím $T_{\lambda\mu}$, elektrickým polem E_i , mechanickou deformací S_λ a indukcí elektrického pole D_i dávají stavové rovnice:

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu}^E T_\mu + d_{j\lambda} E_j$$

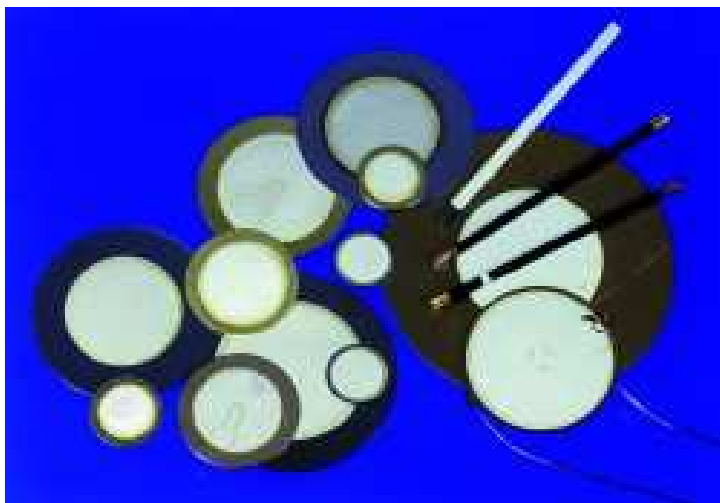
$$D_i = d_{i\mu} T_\mu + \varepsilon_{ij}^T E_j$$

6.1 Rozdělení piezoelektrických struktur

Piezoelektrické ohybové struktury můžeme využít v mnoha aplikacích. Vždy jde o transformaci elektrického napětí na sílu, moment síly nebo tlaku. Tyto struktury pak nazýváme aktuátory pevné fáze. Při opačném jevu, kdy dochází k transformaci mechanické síly, momentu či tlaku na elektrické napětí, je nazýváme senzory.

Tyto struktury můžeme rozdělit do tří základních struktur – unimorfy, bimorfy a polymorfy.

Unimorfy jsou tenké kovové destičky s nalepenou vrstvou PZT keramiky, nejčastěji uspořádané v kruhové konfiguraci, mohou se však také vyskytovat v řadě jiných konfiguracích (např. dlouhý tenký plátek). Využívají se nejčastěji pro tvorbu bzučáků a sirén (obr. 6.1).



Obr. 6.1. Unimorfové bzučáky [9]

Bimorfy jsou také tenké kovové destičky, ovšem obsahují dvě piezoelektrické vrstvy PZT keramiky. Používají se například v pletacích strojích ke zvedání jehel, nebo ke zvedání ventilů u motorů a v podobných aplikacích. Nejčastěji zaujímají tvar podélné dlouhé destičky (obr. 6.2), mohou se však také vyskytovat v jiném tvaru.



Obr. 6.2. Obdélníkové bimorfy [9]

Polymorfy jsou pak struktury obsahující více než dvě piezoelektrické vrstvy PZT keramiky, čímž výrazně zvyšují účinnost převodu elektrické a mechanické energie a zmenšují nutné elektrické napětí při stejném výkonu.

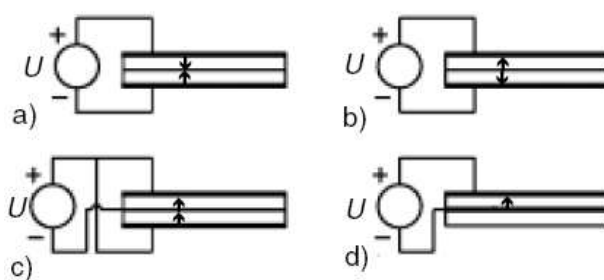
7.1 Piezoelektrický bimorf a jeho vlastnosti

Piezoelektrický bimorf je nejčastěji tenký plátek, který se však může vyskytovat také ve formě disků či jiných struktur. Skládá se z několika vrstev PZT keramiky, popř. může vzniknout kombinací několika jiných materiálů. Většinou se vkládá tenká kovová elektroda mezi dvě vrstvy PZT keramiky. Podle polarity přiloženého napětí a podle polarity piezoelektrických vrstev můžeme bimorfy rozdělit na sériové, paralelní a unimorfy (obr. 7.1)

Sériové bimorfy se vyznačují tím, že je polarita dvou vrstev PZT keramik orientována buď proti sobě, nebo od sebe a neobsahují mezi sebou kovovou elektrodu.

Nejčastěji používané jsou paralelní bimorfy. Mají při stejném napětí dvojnásobnou výchylku než sériové bimorfy. To je dáno tím, že je při stejném napětí v PZT keramice vytvářeno dvojnásobné elektrické pole. To je zapříčiněno střední elektrodou, která je vnořena mezi tyto dvě vrstvy PZT, přičemž je polarita těchto vrstev orientována stejným směrem. Směr polarity je pak výrobcem označen bílým proužkem na pozitivní straně. Vnější plochy PZT vrstev pak obsahují uhlíkové elektrody a celý bimorf je pokryt krycím lakem.

Unimorfy obsahují jen jednu vrstvu PZT keramiky, která je nejčastěji nalepena na kovovou destičku.



Obr. 7.1. a),b) sériový bimorf; c) paralelní bimorf; d) unimorf [2]

7.1.1 Chování bimorfu v elektrickém poli

Piezoelektrické vrstvy bimorfu se deformují v závislosti na intenzitě působícího elektrického pole. Pokud je směr polarity PZT vrstvy souhlasně orientovaný se směrem přiloženého elektrického pole, pak se tato vrstva smršťuje v rovinách kolmých na směr polarizace a natahuje se v rovinách podélných se směrem polarizace.

Pokud je přiložené elektrické pole orientováno opačným směrem než je směr polarity PZT vrstvy, pak se tato vrstva natahuje v rovinách kolmých na směr polarizace a smršťuje se v rovinách podélných se směrem působícího elektrického pole.

Jestliže dojde ke spojení těchto dvou vrstev tak, že se jedna v určitém směru smršťuje a druhá se v témže směru natahuje a pokud nebude docházet ke vzniku podélných deformací v jejich spoji, pak dochází k ohybu celé této struktury (obr. 7.1.1).



Obr. 7.1.1. Ohyb bimorfu

Zatížíme-li konec bimorfu takovou silou, aby se výchylka rovnala nule při určitém připojení napětí, pak tuto sílu nazveme blokovací silou. Tato síla a výchylka jsou důležitými parametry pro využití bimorfů v různých aplikacích.

7.1.2 Parametry piezoelektrických bimorfů

Zjištění těchto parametrů můžeme provést tak, že vezmeme malý element hustoty vnitřní energie, který budeme považovat za vetknutý nosník. V rovnovážném stavu pak na jednom konci budeme uvažovat napětí U a na druhém konci kolmo působící sílu F . Celkovou vnitřní energii poté získáme integrací hustoty vnitřní energie přes celý objem bimorfu. Z této energie lze pak parciální derivací získat výchylku, popř. blokovací sílu [2].

Za předpokladů, že nebudeme uvažovat chování střední elektrody, ve spoji mezi vrstvami PZT nebudou vznikat podélné deformace, délka bimorfu bude mnohem delší než jeho šířka a bude tak docházet pouze k podélným deformacím a že síla F bude způsobovat rovnoměrný ohyb bimorfu, pak můžeme odvodit vztah pro výchylku v závislosti na působící síle a elektrickém napětí pro paralelní bimorf jako [2]:

$$\delta = \frac{L^3 s_{11}^E}{2wh^3} F + \frac{3d_{31}L^2}{4h^2} U \quad (7.1)$$

Kde s_{11}^E je elastická poddajnost kolmo na polarizaci, d_{31} je piezoelektrický koeficient, L je volná délka bimorfu, w je šířka a h je tloušťka piezokeramické vrstvy.

Pokud je blokovácí síla nulová, pak můžeme výchylku určit jako [2]:

$$\delta = \frac{3d_{31}L^2}{4h^2} U \quad (7.2)$$

Pokud je bimorf zatížen blokovací silou a výchylka je nulová, můžeme pak tuto sílu určit jako [2]:

$$F = -\frac{3d_{31}wh}{2Ls_{11}^E} U \quad (7.3)$$

Rezonanční frekvenci pak určíme jako [2]:

$$f_R = 0,161 \frac{2h}{L^2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E}} \quad (7.4)$$

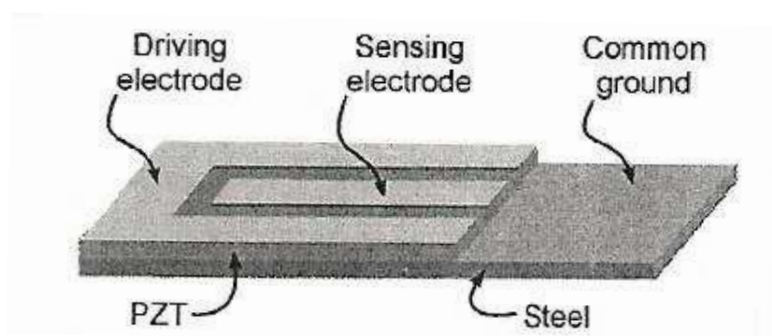
8.1 Určení viskozity kapalin piezoelektrickým unimorfem

První experimenty proběhly v roce 2000 za spolupráce univerzit Drexel a Princeton pod vedením pana Wan Y. Shih. Cílem bylo prozkoumat jak experimentálně tak teoreticky chování piezoelektrického unimorfu jako senzoru ke zjišťování viskozity a hustoty kapalin. Použit byl piezoelektrický unimorf složený z $\text{PbO} \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{TiO}_2$ (PZT) keramiky, která byla nalepena na tenký kovový plátek. Tato tyčinka byla testována v roztoku voda-glycerol o několika různých koncentracích. Ukázalo se, že rezonanční frekvence klesala s narůstajícím procentem glycerolu v roztoku. To potvrdily jak teoretické výpočty, tak pozdější experiment. Z těchto výsledků byly pak spočteny hodnoty viskozity a hustoty jednotlivých roztoků, které blízce korespondovaly se známými tabulkovými hodnotami [4].

8.1.1 Popis a sestavení měřicího zařízení

PZT/ocelový unimorf byl vyroben z PZT plátku (typ EC67) a nerezové ocelové folie [4]. Tento unimorf se skládá z řídící elektrody a ze sensorové elektrody (obr. 8.1.1). Řídící elektroda byla připojena k funkčnímu generátoru. Obdélníková elektroda byla připojena k osciloskopu a slouží jako senzor výchylky unimorfu. Pokud je řídící frekvence shodná s některou z rezonančních frekvencí unimorfu, na měřicí elektrodě byl pozorován značný nárůst napětí. Rezonanční spektrum bylo také měřeno na impedančním analyzátoru HP4192. V tomto případě byla k tomuto analyzátoru připojena pouze řídící elektroda.

Roztoky glycerolu a vody o různých koncentracích glycerolu byly připraveny v následujících poměrech. 1) voda, 2) roztok obsahující 50% vody a 50% glycerolu (50 wt% glycerol), 3) roztok obsahující 25% vody a 75% glycerolu (75 wt% glycerol), 4) glycerol (100 wt% glycerol).



Obr. 8.1.1. Struktura unimorfu [4]

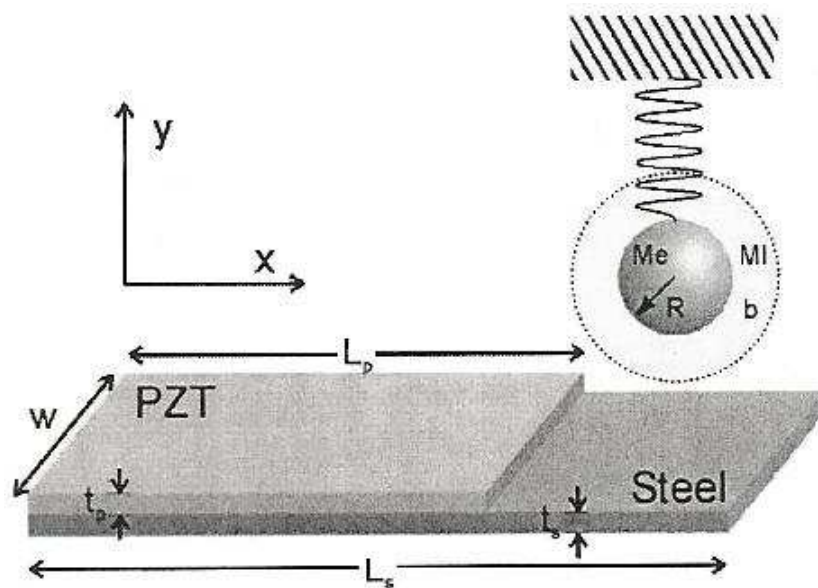
Měřicí aparatura byla sestavena tak, aby byl jen volný konec unimorfu (ocelová špička) vnořen do roztoku, který byl v kádince.

Rozměry použitého unimorfu jsou uvedeny v následující tabulce:

Typ vrstvy	Délka (cm)	Šířka (cm)	Tloušťka (mm)
PZT	3,05	0,6	0,56
Nerezová ocel	4,95	0,6	0,1

Tabulka 8.1: Rozměry PZT/ocelového unimorfu

8.1.2 Teoretická analýza



Obr. 8.1.2. Model kmitající kuličky nahrazující tyčinku [4]

K zajištění efektu axiálně kmitající tyčinky obklopené kapalinou byl použit model, který počítá s náhradou tyčinky za kuličku, která je obklopena téže kapalinou (obr. 8.1.2). Tento model může být použit za těchto předpokladů: (i) tyčinka je mnohem delší než její šířka, (ii) axiální výchylka je nejdelší na špičce tyčinky. Kromě toho dovoluje model oscilující kuličky analytické vyjádření tlumící síly kapaliny. Pokud je tento oscilátor umístěn do kapaliny a je řízen vnější harmonickou silou $F_0 e^{-i\omega t}$, rovnice pro pohyb oscilátoru kmitajícího v ose y může být zapsána jako [4]:

$$(Me + MI) \frac{d^2 y}{dt^2} + (b_{in} + b) \frac{dy}{dt} + Ky = F_0 e^{-i\omega t} \quad (8.1)$$

kde ω je úhlová frekvence, Me a K jsou efektivní hmota a efektivní pružná konstanta na konci tyčinky, MI a b jsou indukovaná hmota a brzdící koeficient dle viskozity kapaliny a b_{in} je vlastní tlumící koeficient tyčinky.

Výraz $MI \frac{d^2 y}{dt^2}$ reprezentuje setrvačnou sílu tyčinky a $b \frac{dy}{dt}$ tlumící sílu kapaliny.

Vlastní tlumící koeficient b_{in} může být ovlivněn lepidlem mezi částmi PZT a nerezovou ocelí a jinými disipativními částmi mechanismu.

Pro oscilující kuličku o poloměru R v kapalině o viskozitě η a hustotě ρ je MI a b analyticky vyjádřeno jako[4]:

$$MI = \frac{2\pi R^3}{3} \rho \left(1 + \frac{9}{2} \frac{\delta}{R} \right) \quad (8.2)$$

a

$$b = \frac{6\pi\eta R^2}{\delta} \left(1 + \frac{\delta}{R} \right) \quad (8.3)$$

kde $\delta = \sqrt{2\eta / \rho\omega}$ je délka vlny kapaliny.

Za nízké viskozity, nebo při vysokých frekvencích je δ téměř srovnatelné s efektivním poloměrem R . V toto případě pak rovnice pro MI a b vypadají takto:

$$MI_{\infty} = \frac{2\pi R^3}{3} \rho \quad (8.4)$$

a

$$b_{\infty} = \frac{6\pi\eta R^2}{\delta} \quad (8.5)$$

Pokud je frekvence nulová, nebo pokud viskozita dosahuje vysoké hodnoty, pak výrazy pro MI a b vypadají takto:

$$MI_0 = 3\pi R^3 \delta \rho \quad (8.6)$$

a

$$b_0 = 6\pi\eta R \quad (8.7)$$

Pro tyčinku o hustotě ρ , tloušťce h , šířce w , délce L může být efektivní hmota vyjádřena jako $0,236 \rho h w L$ [4]. U použitého unimorfu je však ocelová destička delší než PZT vrstva. Výstupní elektrický signál je dán piezoelektrickým efektem PZT vrstvy. To znamená, že výstupní signál odpovídá amplitudě na konci PZT vrstvy a ne na konci celého unimorfu. Proto počítáme s modelem oscilující kuličky umístěném na konci PZT vrstvy ($x=L_p$) a ne na konci celého unimorfu ($x=L_s$). Po této úvaze může být efektivní hmota na konci PZT/ocelového unimorfu vyjádřena jako [4] :

$$Me = 0,236(\rho_p h_p + \rho_s h_s) w L_p + \rho_s h_s w (L_s - L_p) \quad (8.8)$$

kde ρ_p , h_p a L_p jsou hustota, tloušťka a délka PZT vrstvy, ρ_s , h_s a L_s jsou hustota, tloušťka a délka ocelového plátku a w je šířka unimorfu.

První výraz na pravé straně rovnice reprezentuje efektivní hmotu PZT/ocelové části na konci PZT vrstvy. Druhý výraz na pravé straně rovnice pak reprezentuje efektivní hmotu ocelového plátku od konce PZT vrstvy. Rovnice platí za předpokladů: (i) ocelový konec je mnohem lehčí než PZT/ocelová část a (ii) žádná vrstva PZT keramiky není na ocelovém přesahujícím konci.

Protože je konec ocelového plátku mnohem tenčí než PZT/ocelová vrstva je možno jej zanedbat při určení skutečné výchylky na konci PZT/ocelové vrstvy.

Zanedbáním ocelového konce tyčinky může být efektivní ohybová konstanta K na špičce PZT/ocelové vrstvy vyjádřena jako:

$$K = \frac{3D_p w}{L_p^3} \quad (8.9)$$

kde D_p je ohybový modul PZT/ocelové vrstvy, který může být vyjádřen jako

$$D_p = \frac{E_p^2 h_p^4 + E_s^2 h_s^4 + 2E_p E_s h_p h_s (2h_p^2 + 2h_s^2 + 3h_p h_s)}{12(E_p h_p + E_s h_s)} \quad (8.10)$$

kde E_p a E_s jsou Youngův modul pružnosti PZT a ocelové vrstvy.

Nejnižší rezonanční frekvence ve vzduchu může být vyjádřena pomocí Me a K jako:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{Me}} \quad (8.11)$$

Pro vyšší mód rezonance pak může být frekvence vyjádřena jako:

$$f_i = \frac{n_i}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{Me}} \quad (8.12)$$

kde n_i je vlastní číslo (eigenvalue).

Pokud je tyčinka ponořena do kapaliny, rovnice (8.1) dává axiální amplitudu y_0 jako:

$$y_0 = \frac{-F_0}{(\omega^2 - \omega_0^2) + i\omega\gamma} \quad (8.13)$$

a maxima v $|y_0|$ dosahuje, když $\omega = \omega_{\max}$, kde

$$\omega_{\max}^2 = \omega_0^2 - \frac{1}{2}\gamma^2 \quad (8.14)$$

pro

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{Me + MI}} \quad (8.15)$$

budiž rezonanční frekvence bez tlumení a

$$\gamma = \frac{b + b_{in}}{Me + MI} \tag{8.16}$$

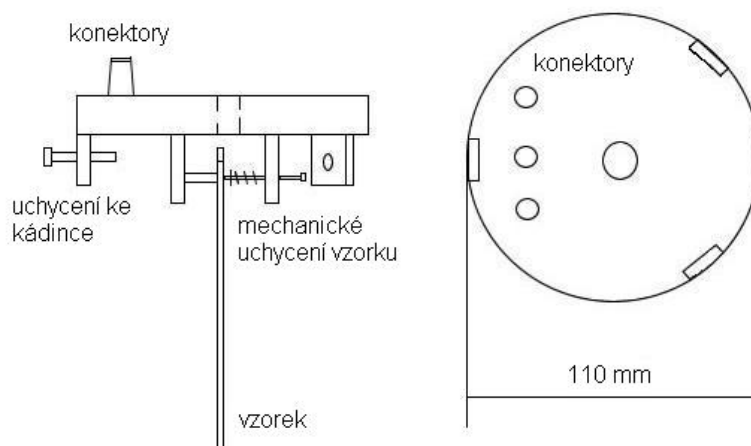
budiž tlumící koeficient.

9.1 Sestavení experimentálního zařízení pro měření rezonančních parametrů piezoelektrických bimorfů

Sestavením tohoto experimentálního zařízení vznikne měřicí soustava umožňující proměřování rezonančních parametrů piezoelektrických bimorfů, která bude moci být využívána i pro pozdější experimenty.

9.1.1 Návrh a realizace měřícího zařízení

Cílem tohoto měřícího zařízení je schopnost měřit rezonanční parametry různých typů piezoelektrických bimorfů (dále vzorků). Důležitá je tedy schopnost upevnění vzorků různých tvarů a vyvedení elektrod vzorku na konektory, ke kterým bude možno připojit řídicí popř. snímaný signál. Tento přípravek by měl také umožňovat měřit rezonanční vlastnosti vzorků z části ponořených do různých typů kapalin. Různý typ kapaliny pak ovlivňuje chování vzorku více či méně v závislosti na jeho velikosti a tvaru. Bylo tedy nutné správně dimenzovat tento přípravek podle rozměrů měřených vzorků a podle velikosti kádínek, ve kterých se bude určitá kapalina nacházet. Zároveň bylo nutno zajistit dostatečně pevné uchycení přípravku ke kádince se zkoumanou kapalinou (obr. 9.1.1).



Obr. 9.1.1. Návrh měřícího přípravku

Podle vytvořeného návrhu byl realizován výsledný měřicí přípravek (obr. 9.1.2a, 9.1.2b)



Obr. 9.1.2a- Realizovaný měřicí přípravek



Obr. 9.1.2b- Realizovaný měřicí přípravek uchycený ke kádince

9.1.2 Měřené typy piezoelektrických bimorfů a jejich parametry

Použito bylo celkem pět paralelních piezoelektrických bimorfů různých rozměrů. Tyto bimorfy vyrobila firma APC International Ltd., jejíž pobočka se nachází v České republice (Piezokeramika, s.r.o., Libřice). Jednotlivé parametry těchto bimorfů dodané výrobcem jsou zobrazeny v tabulce 9.1 a 9.2.

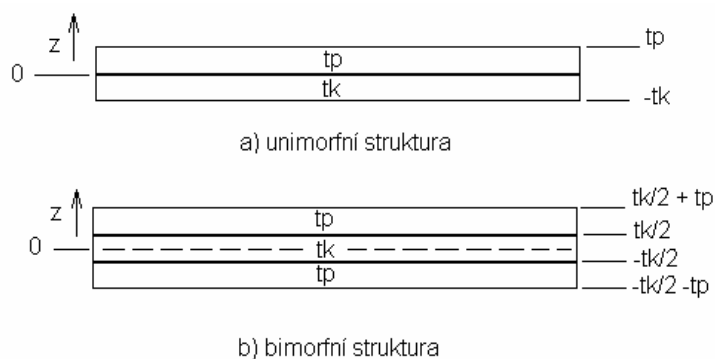
Rozměry (mm)			Volná délka (mm)	úplná odchylka (mm)	Blokující síla (N)	Rezonanční frekvence (Hz)	Kapacita (pF)
délka	šířka	tloušťka					
bimorf 600/200/0.60-SA							
60	20	0,6	53	>2,5	>0,25	65	170
bimorf 490/018/0.60-SA							
49	1,8	0,6	42	>1,5	>0,03	110	25
bimorf 490/021/0.60-SA							
49	2,1	0,6	42	>1,5	>0,05	110	15
bimorf 400/200/0.6-SA							
40	20	0,6	33	>1,0	>0,4	175	115
bimorf 350/025/0.6-SA							
35	2.5	0.6	28	>0.7	>0.06	245	12

Tabulka 9.1. Rozměry a parametry měřených piezoelektrických bimorfů [9]

Typ vrstvy	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
PZT keramika	63	7700
Mosazná elektroda	99	8450

Tabulka 9.2. Youngův modul pružnosti E a hustota ρ PZT keramiky a mosazné prostřední elektrody (APC 850, Piezokeramika, s.r.o., Libřice)

Vzhledem k odlišné geometrii piezoelektrického bimorfu od geometrie piezoelektrického unimorfu bylo nutné upravit vztah pro ohybový modul D_p (8.10). Odlišná struktura je znázorněna na obrázku 9.1.3.



Obr. 9.1.3. Odlišná geometrie a) piezoelektrického unimorfu, b) piezoelektrického bimorfu. Tloušťka piezoelektrické vrstvy je označena jako t_p , tloušťka kovové vrstvy jako t_k .

Při ohybu těchto struktur dochází k deformaci jednotlivých vrstev. To je způsobeno natahováním nebo smršťováním těchto vrstev. V určité části celé struktury se však nachází rovina (neutrální vlákno), která svou délku během ohybu nemění. Polohu tohoto neutrálního vlákna (tn) pak získáme z rovnice [7]:

$$\int_{-t_k/2-t_p}^{-t_k/2} E_p \left(\frac{z-tn}{r} \right) dz + \int_{-t_k/2}^{t_k/2} E \left(\frac{z-tn}{r} \right) dz + \int_{t_k/2}^{t_k/2+t_p} E_p \left(\frac{z-tn}{r} \right) dz = 0 \quad (9.1)$$

kde r je poloměr zakřivení při ohybu. Pozice neutrálního vlákna vyšla po integraci $tn=0$ vzhledem k zvolenému souřadnému systému (obr. 9.1.3). Tento výsledek podpořil teoretický odhad, který počítal s tím, že se pro symetrický bimorf neutrální vlákno nachází přesně uprostřed struktury.

Pokud známe pozici neutrálního vlákna, můžeme vypočítat ohybový modul D_p piezoelektrického bimorfu jako [7]:

$$D_p = \int_{-tk/2-tp}^{-tk/2} E_p (z - tn)^2 dz + \int_{-tk/2}^{tk/2} E (z - tn)^2 dz + \int_{tk/2}^{tk/2+tp} E_p (z - tn)^2 dz \quad (9.2)$$

Po integraci a dosazení za $tn = 0$ odpovídá upravený ohybový modul vztahu:

$$D_p = \frac{2E_p \cdot tp \cdot (3 \cdot tk^2 + 6 \cdot tp \cdot tk + 4 \cdot tp^2) + E \cdot tk^3}{12} \quad (9.3)$$

Po úpravě vztahu (9.8) můžeme vyjádřit ekvivalentní hmotnost Me jednotlivých vzorků bimorfů. Hmotnost vzorku Me tedy vyjádříme jako [8]:

$$Me = 0,236 \cdot (2 \cdot \rho_p \cdot tp + \rho_k \cdot tk) \cdot w \cdot L \quad (9.4)$$

kde w je šířka a L je délka vzorku, tp a ρ_p je tloušťka a hustota keramické vrstvy, tk a ρ_k je tloušťka a hustota prostřední kovové vrstvy.

Po takto provedených úpravách můžeme matematicky vyjádřit rezonanční frekvence všech použitých vzorků. Nejprve vypočteme konstantu K podle vztahu (8.9) a pak vypočteme výslednou rezonanční frekvenci prvního módu podle vztahu (8.11).

9.1.3 Měření parametrů piezoelektrických bimorfů a jejich ověření matematickým výpočtem

Měření těchto piezoelektrických bimorfů bylo provedeno pomocí měřicího přípravku (obr. 9.1.2b) na impedančním analyzátoru (LF Impedance Analyzer HP4192A). Měřicí rozsah impedančního analyzátoru je 5Hz až 13MHz. Pro měření byl využit rozsah 5Hz až 10kHz, který byl dostačující. Proměřeno bylo tedy celkem pět vzorků piezoelektrických bimorfů v paralelním zapojení. Výstupní měřená hodnota byla rezonanční frekvence v závislosti na impedanci a fázovém úhlu.

V tabulce (9.3) jsou znázorněné naměřené rezonanční frekvence jednotlivých typů vzorků společně s jejich volnou délkou. Volná délka je vzdálenost od místa uchycení vzorku až k jeho konci.

Rozměry (mm)			Volná	Naměřená rezonanční frekvence (Hz)
délka	šířka	tloušťka	délka (mm)	
bimorf 600/200/0.60-SA				
60	20	0,6	46	67,7
bimorf 490/018/0.60-SA				
49	1,8	0,6	36	123,02
bimorf 490/021/0.60-SA				
49	2,1	0,6	36	117,48
bimorf 400/200/0.6-SA				
40	20	0,6	28	154
bimorf 350/025/0.6-SA				
35	2,5	0,6	23	213,79

Tabulka 9.3. Naměřená rezonanční frekvence při určité volné délce uchycení

Při porovnání těchto naměřených hodnot s hodnotami dodanými výrobcem (tabulka 9.2) můžeme říci, že proměření vzorků je správné. Drobná odchylka je dána rozdílnou délkou volné délky vzorku, která tuto rezonanční frekvenci ovlivňuje.

Takto naměřené frekvence můžeme ověřit matematickým výpočtem užitím vztahů (8.9), (8.11) a pomocí vztahů (9.3) a (9.4). Pro tyto výpočty bude potřeba znát určité parametry, které jsou uvedeny v tabulce 9.4 a 9.5.

Typ bimorfu	Volná délka	šířka	tloušťka kovové vrstvy	tloušťka piezo vrstvy
	L (mm)	w (mm)	tk (mm)	tp (mm)
bimorf 600/200/0.60-SA	46	20	0,15	0,1
bimorf 490/018/0.60-SA	36	1,8	0,15	0,1
bimorf 490/021/0.60-SA	36	2,1	0,15	0,1
bimorf 400/200/0.6-SA	28	20	0,15	0,1
bimorf 350/025/0.6-SA	23	2,5	0,15	0,1

Tabulka 9.4. Parametry měřených piezoelektrických bimorfů

Typ bimorfu	Youngův modul pružnosti piezo vrstvy	Youngův modul pružnosti kovu	hustota piezo vrstvy	hustota kovové vrstvy
	E_p (GPa)	E (GPa)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_k (kg·m ⁻³)
bimorf 600/200/0.60-SA	63	99	7700	8450
bimorf 490/018/0.60-SA				
bimorf 490/021/0.60-SA				
bimorf 400/200/0.6-SA				
bimorf 350/025/0.6-SA				

Tabulka 9.5. Parametry měřených piezoelektrických bimorfů

Nejprve spočítáme ekvivalentní hmotnost jednotlivých vzorků M_e dosazením jednotlivých parametrů do rovnice (9.4).

Poté spočítáme ohybový modul D_p dosazením jednotlivých parametrů do rovnice (9.3).

Dále pak spočítáme ohybovou konstantu K dosazením do (8.9) a konečně výslednou rezonanční frekvenci pro jednotlivé typy bimorfů získáme aproximací vztahu (8.11).

Spočtené hodnoty hmotností M_e , ohybových modulů D_p , ohybových konstant K a výsledných rezonančních frekvencí f jednotlivých typů bimorfů můžeme vidět v následující tabulce 9.6:

Typ bimorfu	Hmotnost	Ohybový	Ohybová	Rezonanční
	bimorfu	modul	konstanta	frekvence
	M_e (10^{-5} kg)	D_p (N·m)	K (N·m ⁻¹)	f (Hz)
bimorf 600/200/0.60-SA	60,95	0,239	144,79	77,35
bimorf 490/018/0.60-SA	4,293	0,239	27,19	126,64
bimorf 490/021/0.60-SA	5,009	0,239	31,71	126,77
bimorf 400/200/0.6-SA	35,78	0,239	639,58	212,78
bimorf 350/025/0.6-SA	3,529	0,239	144,79	322,38

Tabulka 9.6. Přehled vypočítaných hodnot (zvýrazněny jsou hodnoty vypočítaných rezonančních frekvencí)

Porovnáním vypočítaných hodnot s naměřenými hodnotami můžeme zjistit, zda jsou upravené vztahy a použité rovnice správné (tabulka 9.7).

Typ bimorfu	Naměřená	Vypočítaná
	rezonanční	rezonanční
	frekvence f (Hz)	frekvence f (Hz)
bimorf 600/200/0.60-SA	67,7	77,35
bimorf 490/018/0.60-SA	123,02	126,64
bimorf 490/021/0.60-SA	117,48	126,77
bimorf 400/200/0.6-SA	154	212,78
bimorf 350/025/0.6-SA	213,79	322,38

Tabulka 9.7. Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot

Rozdíly mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami mohou být dány nekvalitním slepením všech tří vrstev, nebo odlišnou tloušťkou jednotlivých vrstev. Přesto můžeme říci, že výpočty jsou správné a odpovídají přibližně naměřeným hodnotám.

10.1 Příprava a měření parametrů testovaných roztoků

Hlavním cílem této práce je zjistit viskozitu roztoků PVA (polyvinyl alkohol), u nichž je tato veličina rozhodující pro tvorbu nanovláken. Rozhodujícím faktorem ovlivňujícím kvalitu tohoto nanovlákná je právě viskozita roztoku, která je odlišná při různých koncentracích. K dispozici byl koncentrovaný roztok PVA s udávanou 16% koncentrací roztoku.

Pro přesné měření a stanovení správných údajů bylo nutno tuto koncentraci přeměřit a poté připravit několik různých koncentrací tohoto roztoku.

Dalšími měřeními kapalinami byla destilovaná voda, glycerin a silikonový olej (Lukosiol M50, Lučební závody, a.s., Kolín). Tyto kapaliny mají tabulkové hodnoty, proto byly vybrány k ověření platnosti naměřených veličin.

10.1.1 Ověření koncentrace roztoku PVA

Pro zjištění koncentrace roztoku PVA použijeme metodu založenou na poměru hmotností malého množství roztoku a jeho sušiny. Použity byly čtyři vzorky zkoumaného roztoku, kde do malých kádinek (váženek) nakapeme malé množství roztoku. Nejprve si zvážíme samotné váženky. Následně zvážíme tyto váženky i s roztokem. Poté vložíme váženky do sušičky, ve které po určité době dojde k vysušení roztoku až na sušinu. Váženky se sušinou opět zvážíme. Všechny hodnoty hmotností jsou zaznamenány v tabulce 10.1.

Při odečtení hmotnosti váženky s roztokem od hmotnosti samotné váženky dostaneme množství samotného roztoku. Při odečtení hmotnosti váženky se sušinou od samotné hmotnosti váženky dostaneme množství sušiny z původního roztoku. Při poměru množství sušiny a množství roztoku získáme hledanou koncentraci roztoku (tabulka 10.2).

váženka číslo		1	2	3	4
hmotnost prázdné váženky	(g)	26,272	23,027	25,953	25,316
hmotnost roztoku s váženkou	(g)	24,409	23,183	26,089	25,463
hmotnost sušiny s váženkou	(g)	26,292	23,05	25,974	25,339

Tabulka 10.1. Hmotnosti váženek, váženek s roztokem a váženek se sušinou

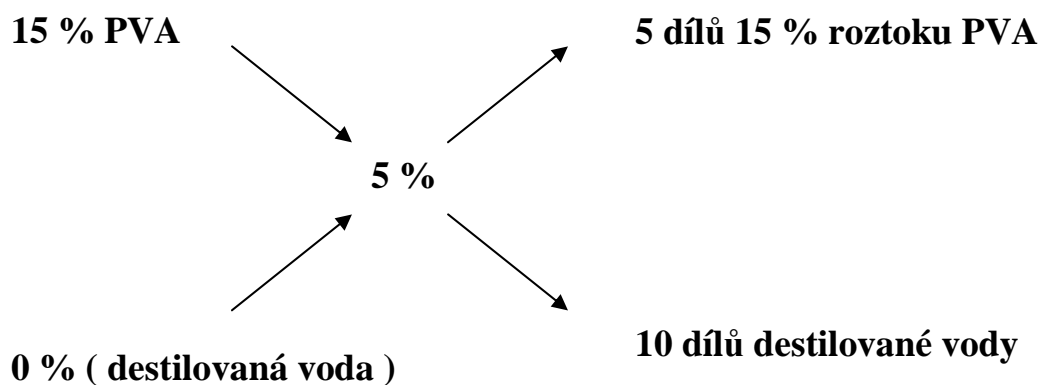
číslo vzorku	hmotnost roztoku (g)	hmotnost sušiny (g)	Výsledná koncentrace (%)
1	137	20	14,59
2	156	23	14,73
3	136	21	15,44
4	147	23	15,64
Průměrná koncentrace roztoku			15,10

Tabulka 10.2. Hmotnosti roztoků a sušiny a výsledná koncentrace roztoku.

Zjistili jsme, že hledaná koncentrace zkoumaného roztoku PVA je 15,1 %.
Dále budeme tedy uvažovat, že výchozí koncentrace roztoku PVA je 15 %.

10.1.2 Příprava různých koncentrací roztoku PVA

Z výchozího 15 % roztoku PVA bylo připraveno celkem pět vzorků odlišných koncentrací. Zvolené koncentrace byly 5 %, 9 %, 12 % a 15 %. Vzorky s těmito koncentracemi připravíme pomocí tzv. směšovacího pravidla, které je popsáno na obr. 10.1.1.



Obr. 10.1.1. Směšovací pravidlo

Na obrázku 10.1.1 vidíme na levé straně 15 % koncentraci roztoku PVA (což je naše výchozí koncentrace) a 0 % roztok, tedy destilovanou vodu. Uprostřed je pak požadovaná koncentrace roztoku. Směšovací pravidlo funguje tak, že od výchozí koncentrace odečteme požadovanou koncentraci a dostaneme počet dílů destilované vody. Dále pak k 0 % roztoku (destilovaná voda) přičteme požadovanou koncentraci roztoku a tím získáme počet dílů výchozího roztoku.

Pokud chceme např. 500g roztoku o koncentraci 5 %, přičemž výchozí koncentrace roztoku je 15 %, připravíme si 166g (5 dílů) 15 % roztoku a 333g (10 dílů) destilované vody. Po smíchání takto připravených vzorků dostaneme 500g roztoku a výsledné koncentraci 5 %.

Tímto způsobem jsme pokračovali u přípravy 9 %, 12 % a 15 % roztoku a získali jsme tak celkem 5 vzorků o požadovaných koncentracích.

10.1.3 Měření parametrů testovaných roztoků

Měřenými parametry testovaných roztoků byly hustota a viskozita. Hustota roztoků byla změřena Mohrovými vážkami. Mohrovy vážky jsou nerovnoramenné pákové váhy, na jejichž delším rameni je zavěšeno ponorné tělísko (obr.10.1.2). Čisté a suché měrné tělísko se zavěsí na konci pravého ramene. Stupnice na levém rameni by měla ukazovat na nulu. Pokud ne, vyrovná se do této polohy šroubováním matic na samém konci pravého ramene. Pak se do přiloženého odměrného válce nalije měřená kapalina tak, aby měrné tělísko bylo zcela ponořeno. Těleso je nadlehčováno tíhou vytlačené kapaliny a rovnováha se tak poruší. Proto na delší rameno zavěšujeme závaží, abychom tuto nerovnováhu vyrovnali. Vážky jsou konstruovány tak, že pověsíme-li největší závaží úplně vpravo, odpovídá nastavení hustotě vody a pokud by v odměrném válci byla, byly by vážky vyrovnané. Pokud při tomto nastavení směřuje pravé rameno šikmo nahoru, má kapalina větší hustotu než voda. Pak se pokusíme vážky vyrovnat tím, že přidáváme další závaží. K dispozici jsou tři typy závaží, z nichž každé má vždy 10krát menší hmotnost, než to předchozí. Výsledná hodnota je pak dána součtem jednotlivých závaží v závislosti na jejich poloze na rameni. Naměřené hustoty jsou uvedeny v tabulce 10.3.



Obr. 10.1.2. Mohrovy vážky [15]

Viskozita roztoků byla naměřena Höpplerovým viskozimetrem, kde byla měřena doba padající kuličky v trubici za určitou vzdálenost (obr.10.1.3). Tato vzdálenost byla 5 cm. Padání kuličky bylo snímáno kamerou a čas pádu kuličky v úseku 5 cm byl později vyhodnocován z videozáznamu. Viskozita pak byla vypočtena pomocí vztahu (2.13).

Parametry padající kuličky jsou uvedeny v tabulce 10.1. Doba padání kuličky v jednotlivých roztocích a vypočítaná rychlost jsou uvedeny v tabulce 10.2. Získaná viskozita jednotlivých roztoků je uvedena v tabulce 10.3.



Obr. 10.1.3. Záznam měření Höpplerovým viskozimetrem

hmotnost	průměr	hustota
m (g)	D (mm)	ρ (kg·m ⁻³)
$4,08 \pm 0,01$	$10,00 \pm 0,05$	7792 ± 78

Tabulka 10.1. Parametry padající kuličky

Kulička byla zvážena na digitálních vahách s přesností 0,01g.

Hustota se vypočítá podle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{4\pi \cdot R^3} \quad (10.1)$$

Výsledná chyba hustoty kuličky se pak spočítá jako:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial m}\right)^2 \cdot (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial R}\right)^2 \cdot (\Delta R)^2} \quad (10.2)$$

typ kapaliny	t (s)	v (m·s ⁻¹)
5% PVA	$0,100 \pm 0,02$	$0,500 \pm 0,1$
9% PVA	$0,280 \pm 0,02$	$0,1785 \pm 0,01$
12% PVA	$0,560 \pm 0,02$	$0,0893 \pm 0,003$
15% PVA	$4,130 \pm 0,02$	$0,0121 \pm 0,0001$
glycerin	$0,210 \pm 0,02$	$0,2380 \pm 0,02$

Tabulka 10.2. Doba pádu kuličky v 5 cm úseku a její rychlost
v jednotlivých kapalinách

Doba pádu kuličky byla vyhodnocována z videozáznamu, který byl pořízen videokamerou se snímkovací frekvencí 25 snímků za sekundu, čili s periodou 0,04s. Chyba Δt byla určena jako polovina této periody. Vzdálenost značek v Höpplerově viskozimetru byla změřena milimetrovým papírem. Chybu této vzdálenosti tedy určíme jako polovinu jednoho dílku, čili $\Delta s = 0,5\text{mm}$.

Rychlost v se vypočítá podle vztahu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (10.3)$$

Výsledná chyba rychlosti se pak spočítá jako:

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)^2 \cdot (\Delta s)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 \cdot (\Delta t)^2} \quad (10.4)$$

typ kapaliny	Hustota ρ (kg·m ⁻³)	viskozita η (Pa·s)
5% roztok PVA	1005 ± 1	0,740 ± 0,144
9% PVA	1015 ± 1	2,07 ± 0,114
12% PVA	1026 ± 1	4,135 ± 0,164
15% PVA	1033 ± 1	30,474 ± 0,721
glycerin	1219 ± 1	1,5065 ± 0,1267
silikonový olej	961 ± 1	0,05*
voda	998 ± 1	0,001*

Tabulka 10.3. Naměřené hustoty a viskozity roztoků

(* tabulková hodnota)

Viskozitu jednotlivých roztoků spočítáme pomocí vztahu (2.13).

Výsledná chyba viskozity se pak spočítá jako:

$$\Delta \eta = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial R}\right)^2 \cdot (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho_{kul}}\right)^2 \cdot (\Delta \rho_{kul})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho_{kap}}\right)^2 \cdot (\Delta \rho_{kap})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial v}\right)^2 \cdot (\Delta v)^2} \quad (10.5)$$

11.1 Měření viskozity různých kapalin piezoelektrickým bimorfem

Tento princip určení viskozity kapalin je založen na změření rezonanční frekvence a šířky peaku fáze v polovině jeho výšky bimorfu zčásti ponořeného do určité kapaliny. Různá viskozita kapalin pak ovlivní právě zmiňovanou hodnotu rezonanční frekvence a velikost šířky peaku. Záleží také na ponořené délce bimorfu. V tomto experimentu byla ponořena do kapaliny vždy jedna třetina volné délky bimorfu. Pro popis chování bimorfu zčásti ponořeného do kapaliny byl použit model, který je popsán v kapitole 8.1.

11.1.1 Princip měření viskozity piezoelektrickým bimorfem zčásti ponořeným do zkoumané kapaliny

Každý bimorf byl označen bílým proužkem v jedné třetině své volné délky (tabulka 11.1). Do kádinky, která je součástí měřicího přípravku (obr. 9.1.2.b) byla nalita kapalina do takové výšky, aby byla ponořena právě jedna třetina testovaného bimorfu. Po dokonalém upevnění držáku měřicího přípravku ke kádince byly elektrody měřicího přípravku připojeny na impedanční analyzátor (LF Impedance Analyzer HP4192A). Obě vnější elektrody paralelního bimorfu byly zapojeny na jeden pól držáku, stěrní kovová část na druhý pól. Přes měřicí software bylo spuštěno měření, vyhodnocující závislost impedance a fázového úhlu na velikosti frekvence bimorfu. Rozsah frekvencí byl nastaven nejprve od 10Hz do 10kHz při sto hodnotách na dekádu (široké spektrum) a poté byl změřen detail nejvyššího peaku rezonanční frekvence tohoto širokého spektra. Všechny hodnoty byly ukládány do souborů (součástí příloženého CD), z kterých se pak celé měření vyhodnocovalo. Z těchto naměřených dat byly vypracovány grafy, ve kterých je zobrazen detail okolí rezonanční frekvence. Tyto grafy zobrazují závislost fázového úhlu na velikosti frekvence pro každý bimorf, ponořený postupně do všech typů kapalin (příloha A).

Ze získaných dat byly také vypracovány tabulky obsahující hodnoty rezonančních frekvencí a velikosti šířek peaků v polovině jejich výšky (tento údaj je důležitý pro matematický popis modelu) u všech typů bimorfů ponořených postupně do všech testovaných kapalin (příloha B).

Typ bimorfu	Volná délka	Ponořená délka
	L	L_p
	(mm)	(mm)
bimorf 600/200/0.60-SA	46	15
bimorf 490/018/0.60-SA	36	13
bimorf 490/021/0.60-SA	36	13
bimorf 400/200/0.6-SA	27	9
bimorf 350/025/0.6-SA	23	8

Tabulka 11.1. Volná a ponořená délka bimorfu

11.1.2 Princip určení viskozity kapalin z naměřených dat

Pro určení viskozity jednotlivých roztoků budeme vycházet z rovnice (8.14). Vzhledem k tomu, že naměřená data odpovídají druhému rezonančnímu módu, bude tuto rovnici nutno upravit o poměr n mezi druhou a první rezonanční frekvencí. Upravená rovnice pak odpovídá tvaru:

$$\omega_{\max}^2 = n^2 \cdot \omega_0^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 \quad (11.1)$$

kde za ω_0 dosadíme vztah (8.15). Výchozí rovnice pak odpovídá vztahu

$$4 \cdot \pi^2 f_{\max}^2 = \frac{n^2 \cdot K}{Me + \frac{2 \cdot \pi \cdot R^3 \rho}{3} \left(1 + \frac{9}{2} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{\rho \cdot \pi \cdot f_{\max}}} \right)} - 2 \cdot \pi^2 \cdot \gamma^2 \quad (11.2)$$

kde jsme za MI dosadili vztah (8.2) f_{\max} odpovídá naměřené rezonanční frekvenci a γ odpovídá naměřené šířce peaku v jeho polovině výšky. Me a K jsou konstanty bimorfu, ρ a η jsou hustota a viskozita kapaliny, v níž je bimorf ponořen.

Pro vyjádření viskozity η z této rovnice je nutné znát ještě poloměr R . Tento poloměr určíme tak, že dosadíme za ρ a η tabulkové hodnoty vody a za f_{\max} a γ dosadíme námi naměřené hodnoty bimorfem ponořeným do vody. Ve výsledné rovnici nám tedy zůstane pouze jedna neznámá R , kterou hledáme a kterou následně vypočteme.

Pokud známe poloměr R , nic nám nebrání v tom, abychom z této rovnice vyjádřili viskozitu η ve tvaru:

$$\eta = \left(\frac{3 \cdot K \cdot n^2 - 2\pi^2 \cdot R \cdot (2 \cdot f_{\max}^2 + \gamma^2) \cdot (3 \cdot Me - 2\pi \cdot R^2 \cdot \rho)}{18 \cdot \pi^3 \cdot R^2 \cdot \rho \cdot (2 \cdot f_{\max}^2 + \gamma^2)} \right)^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot f_{\max} \quad (11.3)$$

11.1.3 Ověření teoretické analýzy

Toto ověření provedeme pro bimorf 490-018-060-SA. Nejprve tedy vypočteme poloměr R pro vodu, se kterým pak budeme počítat pro další určení viskozity η odlišných roztoků. Do rovnice (11.2) dosadíme za Me a K údaje z tabulky 9.6. Hodnoty rezonanční frekvence f_{\max} , šířky peaku γ v polovině jeho výšky a poměr druhé a první rezonanční frekvence n naměřené ve vodě dosadíme z tabulky B.1. Za ρ a η pak dosadíme tabulkové hodnoty vody. Vypočítáme R (Výpočet proveden v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD).

Výsledné **$R=0,0023799$ m.**

S takto vypočítaným poloměrem můžeme ověřit vztah (11.3) vypočtením viskozity η vody dosazením naměřených hodnot pro vodu (tabulka B.1).

Výsledná viskozita vody $\eta = 0,0011 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Tabulková hodnota viskozity η pro vodu odpovídá $\eta = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Po takto provedeném kontrolním výpočtu můžeme říci, že spočtený poloměr R a vztah odvozený pro viskozitu η jsou správné a výsledná vypočítaná viskozita odpovídá tabulkové hodnotě.

Nyní můžeme přistoupit k určení viskozity všech testovaných roztoků dosazováním naměřených hodnot (tabulka B.1) do vztahu (11.3). Výsledné hodnoty viskozity všech roztoků jsou znázorněné v následující tabulce:

Bimorf 490/018/060 SA		R určené z vody
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η Bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,125
9% PVA	2,07	0,6976
12% PVA	4,1335	1,9268
15% PVA	30,474	9,919
glycerin	1,5065	0,503
olej	0,05*	0,0765

Tabulka 11.2. Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 490/018/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí přiloženého CD, * tabulková hodnota)

Z údajů v tabulce je zřejmé, že vypočítané hodnoty viskozity roztoků ne příliš odpovídají viskozitám změřeným Höpplerovým viskozimetrem. To je zřejmě způsobeno tím, že poloměr R vypočítaný ve vodě není příliš přesný pro určování vysokých viskozit, kterými se testované roztoky PVA vyznačují. Naopak vypočítaná hodnota oleje se téměř shoduje s tabulkovou hodnotou.

Po této úvaze vypočítáme poloměr R ne pomocí údajů získaných měření vody, nýbrž pomocí údajů získaných měření glycerinu. Viskozita glycerinu se výrazněji podobá viskozitě roztoků PVA. Tabulkové hodnoty glycerinu jsou rovněž známy, proto můžeme tento postup uplatnit.

Do rovnice (11.2) dosadíme za Me a K údaje z tabulky 9.6. Hodnoty rezonanční frekvence f_{max} , šířky peaku γ v polovině jeho výšky a poměr druhé a první rezonanční frekvence n naměřené v glycerinu dosadíme z tabulky B.1. Za ρ dosadíme změřenou a za η dosadíme tabulkovou hodnotu glycerinu. Vypočítáme R (Výpočet proveden v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD).

Výsledné **$R = 0,002125$ m.**

Nyní můžeme přistoupit k přesnějšímu určení viskozity všech testovaných roztoků dosazováním naměřených hodnot (tabulka B.1) do vztahu (11.3). Výsledné hodnoty viskozity všech roztoků jsou znázorněny v následující tabulce:

Bimorf 490/018/060 SA		R určené z glycerínu
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem	η bimorfem
	(Pa·s)	(Pa·s)
voda	0,001*	0,1230
5% PVA	0,74	0,5567
9% PVA	2,07	1,803
12% PVA	4,1335	4,2014
15% PVA	30,474	17,609
glycerin	1,5065	1,5032
olej	0,05*	0,4199

Tabulka 11.3. Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 490/018/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Z údajů v tabulce je zřejmé, že provedenou úpravou jsme se výrazně přiblížili odpovídajícím hodnotám. Dosáhli jsme téměř shodných údajů získaných Höpplerovým viskozimetrem. Také je patrné, že s poloměrem vypočítaným pomocí glycerinu nemůžeme brát hodnotu viskozity vody a oleje příliš vážně. Jak už bylo řečeno, viskozita vody se výrazně liší od viskozity glycerinu. Proto je určení viskozity vody s R vypočítaným pomocí glycerinu velmi nevhodné a nepřesné.

Všechny ostatní vypočtené hodnoty viskozit pro zbylé testované bimorfy s R pro vodu a s R pro glycerin jsou v příloze C.

12.1 Diskuze získaných výsledků

Ze získaných výsledků můžeme učinit několik závěrů. Pro určení viskozity kapalin piezoelektrickým bimorfem velice záleží na jeho rozměrech. Dalším důležitým parametrem je výpočet R . Pokud počítáme R z vody, viskozita získaná piezoelektrickým bimorfem vykazuje shodu pouze u kapalin s podobnou viskozitou. Tímto způsobem můžeme tedy určovat viskozitu pouze u nízkoviskózních kapalin, v našem případě šlo o vodu a silikonový olej. U nízkoviskózních kapalin dosahujeme největší souhlas výsledků u **užších** a **delších** bimorfů. Optimální rozměr bimorfu, kterým jsme dosáhli nejlepší shody u vody, silikonového oleje a glycerinu, kde R bylo vypočítáno z vody, byl bimorf 400/200/060-SA. Voda, silikonový olej a glycerin jsou tzv. Newtonovské kapaliny. Ty se nevykazují přílišnou složitostí svých molekul. Naopak roztoky PVA jsou polymerního charakteru, což znamená, že jejich molekuly mohou vytvářet složité struktury, což způsobuje jejich vysokou viskozitu. Z toho plyne, že určování viskozity těchto roztoků pomocí R počítaným z vody je nevhodné, což potvrzují získané výsledky.

K určování viskozity roztoků PVA je tedy nutné vypočítat R z vysokoviskózní kapaliny, v našem případě šlo o glycerin. S tímto poloměrem dosahujeme výrazně přesnější shody výsledků viskozity získaných piezoelektrickým bimorfem v porovnání s jinými metodami měření. Naopak velmi špatných výsledků dosahujeme u nízkoviskózních kapalin. Opět velmi záleží na rozměrech bimorfu. Zde jsme dosáhli lepší souhlas pro užší bimorf o stejné volné délce. Nejlepších výsledků pro viskozitu roztoků PVA, při poloměru R počítaným z glycerinu, jsme dosáhli bimorfem 490/018/060-SA. Značnou shodu v porovnání s jinými metodami měření však vykazuje také bimorf 400/200/060-SA. S tímto bimorfem, kde R bylo počítané pro glycerin, dosahujeme přibližné shody pro roztoky PVA, ale také pro vodu a silikonový olej, což jsou nízkoviskózní kapaliny.

Získané výsledky jsou také velmi ovlivněné numerickou přesností použitých dat. Nejvýraznějším parametrem se jeví právě R , velmi důležité jsou ale také údaje rezonančních frekvencí a především jejich poměrů. Tyto parametry způsobují, že při měření viskozity kapalin piezoelektrickým bimorfem jsme dosáhli pouze orientačních výsledků. Preciznější měření by pak bylo ovlivněno vhodnou volnou délkou bimorfu, rozměry a samozřejmě vhodnou délkou ponoření.

Můžeme si také všimnout, že pro neNewtonovské kapaliny, jimiž jsou roztoky PVA, je shoda viskozity měřené piezoelektrickým bimorfem v porovnání s jinými metodami měření horší zvláště pro vysoké koncentrace. To je způsobené zřejmě tím, že R bylo počítáno z glycerinu. Glycerin vykazuje o další řád menší viskozitu, než je viskozita vysoce koncentrovaných roztoků PVA. Pro přesnější určení viskozity těchto vysoce koncentrovaných roztoků PVA by bylo tedy vhodné vypočítat R z roztoku podobné viskozity.

Závěr

Začátek této práce je věnován základnímu popisu a struktuře kapalin. Jednou z hlavních vlastností kapalin je viskozita.

Popis viskozity a viskózního chování kapalin je pak vysvětleno v několika následujících kapitolách. Vysvětleny a popsány jsou zde pojmy jako je statická a dynamická viskozita, závislost viskozity na vnějších vlivech a rozdělení kapalin na dva základní typy – Newtonovské a neNewtonovské. Dále pak následuje odvození vztahů, které viskozitu kapalin určují.

Neméně důležitou částí práce je kapitola věnovaná metodám měření viskozity kapalin a odvození vztahů pro jednotlivé typy viskozimetrů.

Zcela odlišným oborem je pak část zabývající se piezoelektrickým jevem a jeho využitím. Jsou zde vysvětleny základní principy piezoelektrického jevu, typy piezoelektrických materiálů a jejich struktura. Zvláštní pozornost je věnována piezoelektrické keramice, popisem její vnitřní struktury a důležitých vlastností. Následuje stručný přehled piezoelektrických struktur, z nichž největší pozornost je věnována piezoelektrickému bimorfu. Popsána je jeho základní struktura, typy piezoelektrických bimorfů, chování v elektrickém poli a důležité parametry.

Důležitou částí práce je pak kapitola popisující chování kmitající tyčinky obklopené kapalinou, následná náhrada této tyčinky modelem kmitající kuličky v kapalině a matematický popis tohoto modelu.

Dále následuje návrh a realizace experimentálního zařízení pro měření vlastností piezoelektrických bimorfů. Popsány jsou typy měřených bimorfů doplněné o dopočet jejich důležitých parametrů. Tyto parametry byly následně ověřeny matematickým výpočtem rezonančních frekvencí všech měřených typů bimorfů a porovnáním s hodnotami dodanými výrobcem. Teoretické výpočty a údaje dodané výrobcem se shodovaly.

Tato práce nese název měření viskozity kapalin piezoelektrickým bimorfem, bylo tedy nutné připravit různé druhy kapalin, které by toto měření umožňovaly. Příprava těchto kapalin, měření jejich parametrů a vlastností různými metodami je popsána v následující části práce.

Nejdůležitější kapitolu tvoří samotné měření viskozity různých kapalin piezoelektrickým bimorfem. Je zde vysvětlen princip měření, popis měřícího zařízení a

vyhodnocení získaných dat. Dále je zde popsáno, jak se z těchto dat určí požadovaná viskozita jednotlivých kapalin, další potřebné a důležité parametry potřebné k získání správných výsledků a způsob jejich určení.

Poslední kapitolu práce tvoří diskuze získaných výsledků. Z této diskuze vyplývá, že velmi důležitým parametrem určujícím výslednou viskozitu kapalin jsou rozměry piezoelektrického bimorfu. Dále je zřejmé, že tato metoda měření viskozity je závislá na kalibraci pro určité typy roztoků. Např. při kalibraci na nízkoviskózní roztoky nelze dobře měřit viskozitu vysokoviskózních kapalin a naopak při kalibraci na měření vysokoviskózních roztoků nelze dobře měřit roztoky nízkoviskózní. Při celkovém zhodnocení výsledků můžeme říci, že tato metoda měření viskozity slouží pouze k určení orientačních údajů a pro přesnější získání výsledků touto metodou je nutno najít optimální rozměry piezoelektrického bimorfu vhodné pro určitý rozsah viskozit měřeného roztoku.

Seznam odborné literatury:

- [1] J.Erhart: Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika Elektro 11 (2002) 4-7
- [2] P.Půlpán, J.Erhart: Parametry piezoelektrických bimorfů, Elektro 3 (2002) 4-7
- [3] J.G.Smits, A.Ballato: Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Cantilever Bimorphs, J.Microelectromech. Syst. 3, 3 (1994) 105-112
- [4] W.Y.Shih, X.Li, H.Gu, W.-H. Shih, I.A.Aksay: Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers, J.Appl.Phys. 89, 2 (2001) 1497-1505
- [5] J.Brož a kol.: Základy fyzikálních měření I., SPN Praha 1967, “Měření viskozity“, str. 135-140
- [6] S.Đađo, M. Kreidl: Senzory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, str. 156-160
- [7] X. Li, W.Y.Shih, I.A.Aksay, W.-H. Shih: Electromechanical Behaviour of PZT-Brass Unimorphs, J.Am.Ceram. Soc. 82, 7 (1999) 1733-40
- [8] J.Merhaut: Teoretické základy elektroakustiky, Academia, Praha 1971, str. 102
- [9] http://www.americanpiezo.com/products_services/stripe_actuators.html
- [10] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Glycerín>
- [11] <http://lucbni.hink.cz/data/data/Lukosiol/Prospekty/Lukosiol.pdf>
- [12] http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_viskozity.html
- [13] <http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%203.pdf>
- [14] [http://rum.bf.jcu.cz/public/fyzikala/texty_opravene/06_Plyny,kapaliny,_tuhe_latky_\(opraveno\)r.doc](http://rum.bf.jcu.cz/public/fyzikala/texty_opravene/06_Plyny,kapaliny,_tuhe_latky_(opraveno)r.doc)
- [15] <http://www.quido.cz/mereni/vazky.htm>

Přílohy

Seznam příloh

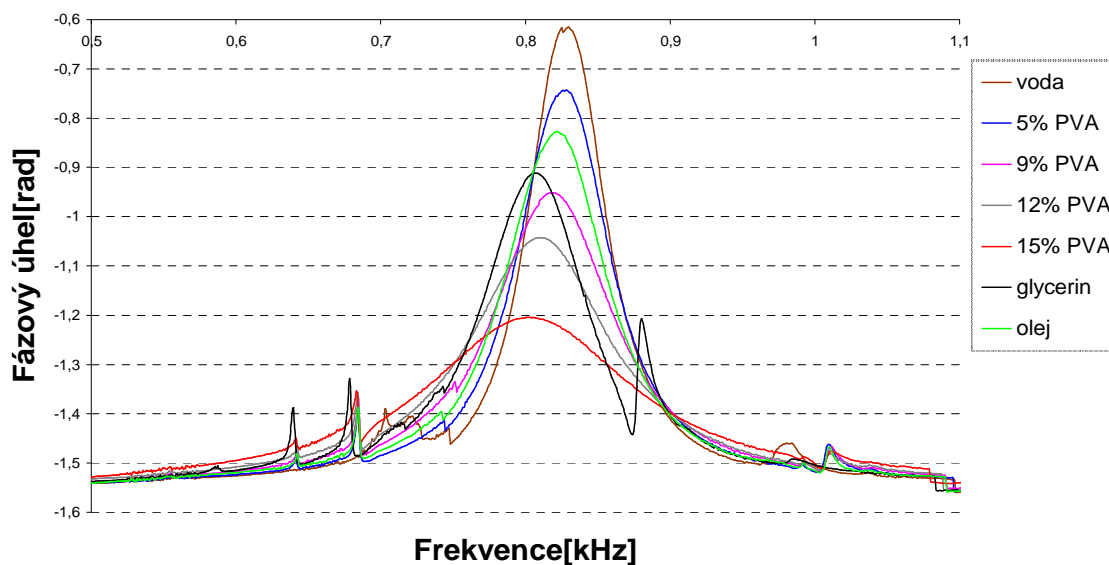
Příloha A- Grafy naměřených hodnot

Příloha B- Tabulky důležitých údajů z naměřených dat

Příloha C- Tabulky s vypočítanými viskozitami pro jednotlivé typy bimorfů

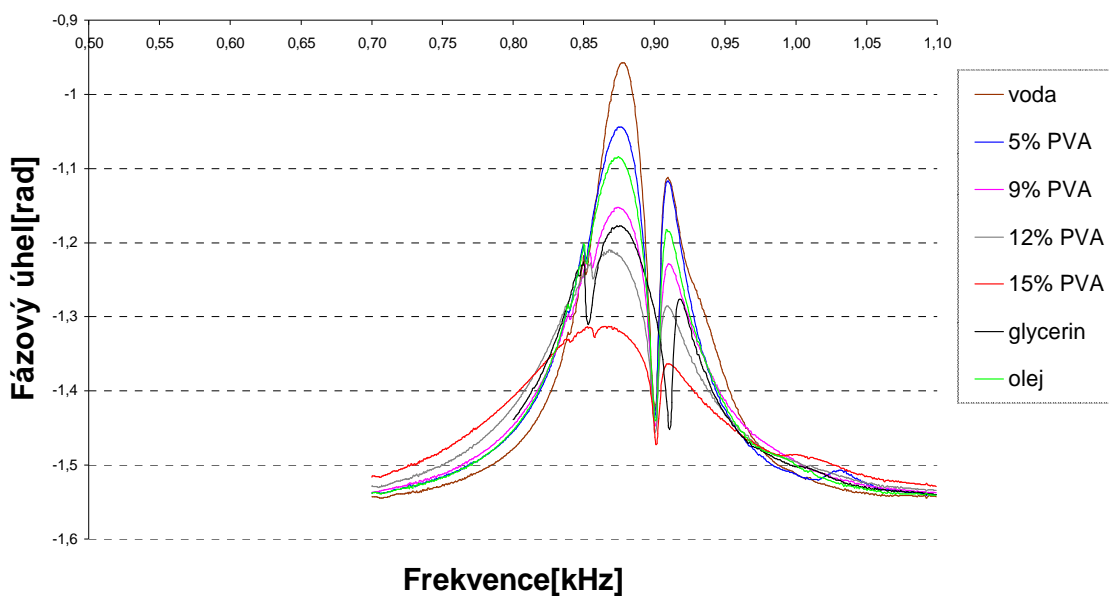
Příloha A – Grafy naměřených hodnot

Fázový úhel vs frekvence PZT bimorfu 490-018-.60-SA



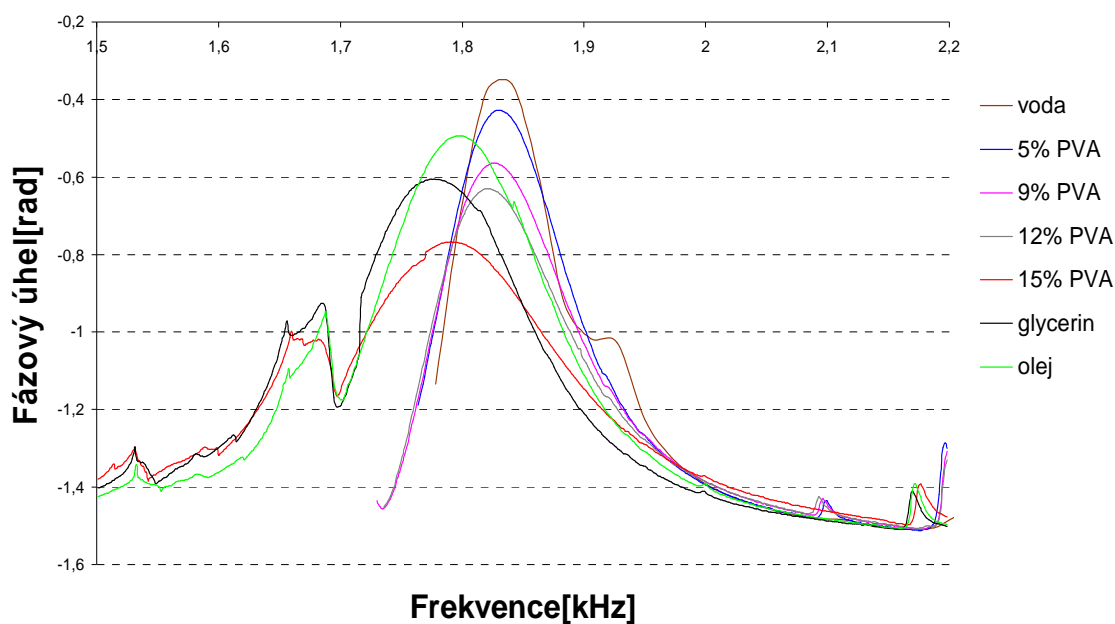
Graf A.1- Závislost fázového úhlu na frekvenci bimorfu 490-018-.60-SA podle typu kapaliny v okolí druhého rezonančního módu

Fázový úhel vs frekvence PZT bimorfu 490-021-.60-SA



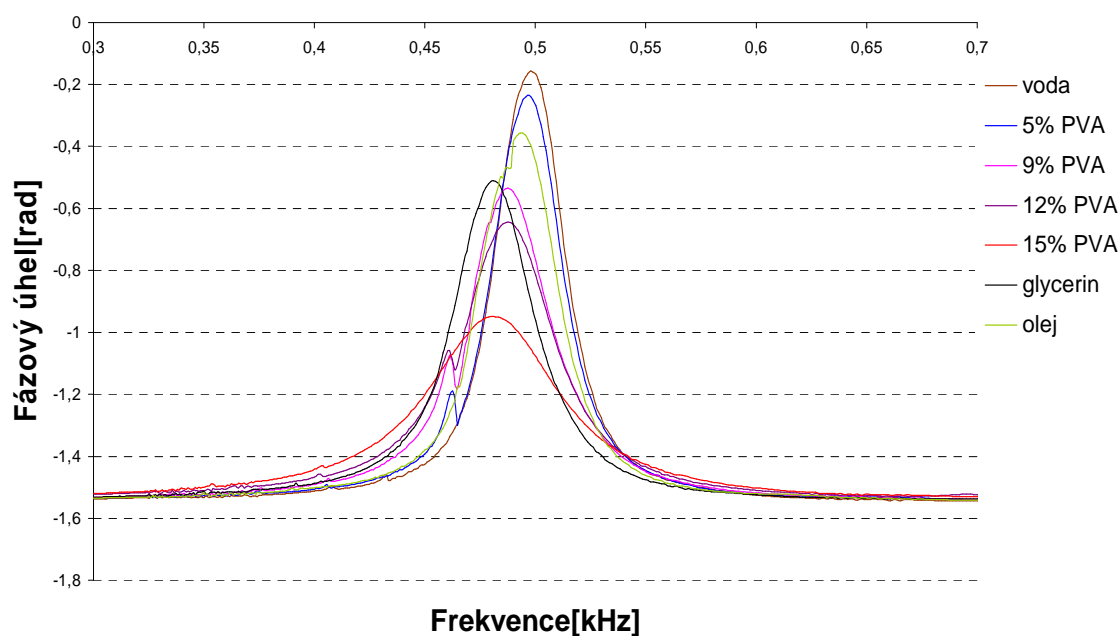
Graf A.2- Závislost fázového úhlu na frekvenci bimorfu 490-021-.60-SA podle typu kapaliny v okolí druhého rezonančního módu

Fázový úhel vs frekvence PZT bimorfu 350-025-.60-SA



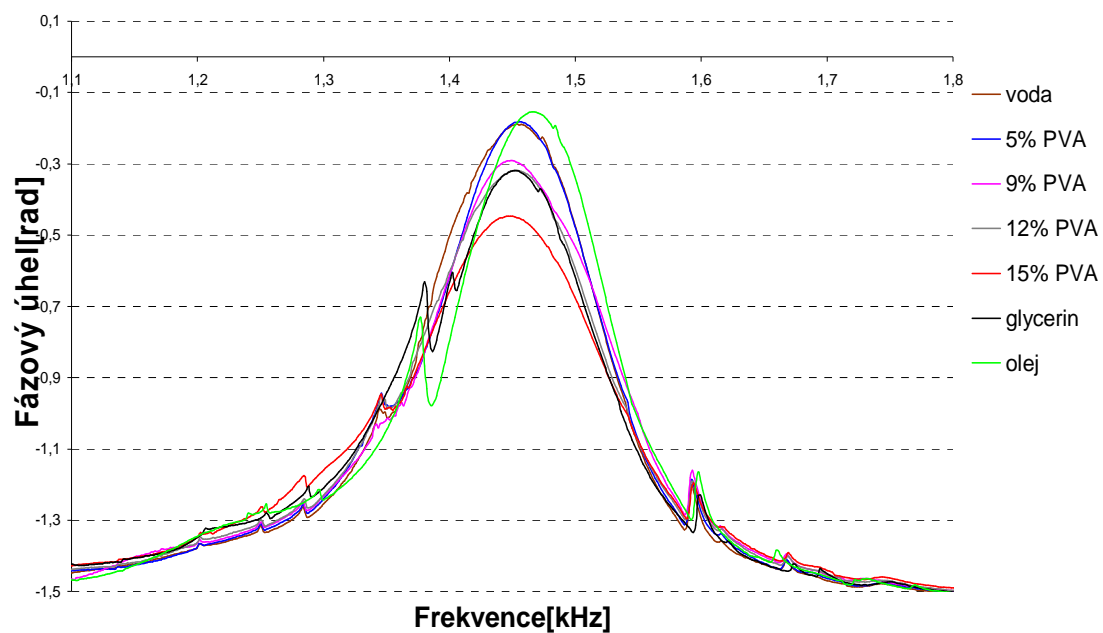
Graf A.3- Závislost fázového úhlu na frekvenci bimorfu 350-025-.60-SA podle typu kapaliny v okolí druhého rezonančního módu

Fázový úhel vs frekvence PZT bimorfu 600-200-.60-SA



Graf A.4- Závislost fázového úhlu na frekvenci bimorfu 600-200-.60-SA podle typu kapaliny v okolí druhého rezonančního módu

Fázový úhel vs frekvence PZT bimorfu 400-200-.60-SA



Graf A.5- Závislost fázového úhlu na frekvenci bimorfu 400-200-.60-SA podle typu kapaliny v okolí druhého rezonančního módu

Příloha B – Tabulky důležitých údajů z naměřených dat

Bimorf 490/018/0.60-SA					
typ kapaliny	f(1) (Hz)	$\gamma(1)/2\pi$ (Hz)	f(2) (Hz)	$\gamma(2)/2\pi$ (Hz)	n (f(2)/f(1))
vzduch	123	13,849	881,049	62,862	7,163
voda	97,72	13,512	829,793	62,923	8,49153704
5% PVA	91,201	28,365	827,885	73,205	9,07758687
9% PVA	83,176	94,208	818,408	95,164	9,83947292
12% PVA	75,858	108,478	809,972	112,601	10,6774763
15% PVA	61,66	šum	801,623	161,502	13,0006974
glycerin	81,283	52,239	807,179	82,506	9,93047747
silikonový olej	93,325	44,02	822,186	80,259	8,80992231

Tabulka B.1- První a druhá rezonanční frekvence, šířka peaku v půlce jeho výšky a poměr rezonančních frekvencí n Bimorfu 490/018/0.60-SA. Vše v závislosti na typu kapaliny

Bimorf 490/021/0.60-SA					
typ kapaliny	f(1) (Hz)	$\gamma(1)/2\pi$ (Hz)	f(2) (Hz)	$\gamma(2)/2\pi$ (Hz)	n (f(2)/f(1))
vzduch	117,48	10	954,99	65	8,12895812
voda	95,493	19	877,199	43,55	9,18600316
5% PVA	95,49	26	876,526	53,941	9,1792439
9% PVA	neměřeno	neměřeno	874,451	65,58	nezname
12% PVA	neměřeno	neměřeno	868,49	78,409	nezname
15% PVA	neměřeno	neměřeno	867,829	105,641	nezname
glycerin	87,036	šum	875,837	79	10,062928
silikonový olej	neměřeno	neměřeno	874,51	59,822	nezname

Tabulka B.2- První a druhá rezonanční frekvence, šířka peaku v půlce jeho výšky a poměr rezonančních frekvencí n Bimorfu 490/021/0.60-SA. Vše v závislosti na typu kapaliny

Bimorf 350/025/0.60-SA					
typ kapaliny	f(1) (Hz)	$\gamma(1)/2\pi$ (Hz)	f(2) (Hz)	$\gamma(2)/2\pi$ (Hz)	n (f(2)/f(1))
vzduch	213,796	14,93	1879,712	149,25	8,79208217
voda	171,79	21,97	1840,72	96	10,7149427
5% PVA	165,959	27,09	1829,88	123	11,0260968
9% PVA	154,882	35,11	1827,08	128,199	11,7965935
12% PVA	138,038	44,69	1821,48	132,657	13,1954969
15% PVA	šum	šum	1792,357	205,306	nezname
glycerin	147,911	37	1774,562	181,071	11,9974985
silikonový olej	162	29,91	1797,809	164,583	11,0975864

Tabulka B.3- První a druhá rezonanční frekvence, šířka peaku v půlce jeho výšky a poměr rezonančních frekvencí n Bimorfu 350/025/0.60-SA. Vše v závislosti na typu kapaliny

Bimorf 600/200/0.60-SA					
typ kapaliny	f(1) (Hz)	$\gamma(1)/2\pi$ (Hz)	f(2) (Hz)	$\gamma(2)/2\pi$ (Hz)	n (f(2)/f(1))
vzduch	67,7	7,88	575,44	46	8,49985229
voda	37,584	4,314	497,876	36	13,24702
5% PVA	36,03	6,951	496,731	37,724	13,7865945
9% PVA	35,755	7,394	487,665	40,529	13,6390715
12% PVA	30,2	šum	487,665	46,109	16,1478477
15% PVA	29,969	šum	482,082	71,806	16,0860222
glycerin	30,903	7,28	480,974	42	15,5639906
silikonový olej	33,625	6,825	494,43	40,805	14,7042379

Tabulka B.4- První a druhá rezonanční frekvence, šířka peaku v půlce jeho výšky a poměr rezonančních frekvencí n Bimorfu 600/200/0.60-SA. Vše v závislosti na typu kapaliny

Bimorf 400/200/0.60-SA					
typ kapaliny	f(1) (Hz)	$\gamma(1)/2\pi$ (Hz)	f(2) (Hz)	$\gamma(2)/2\pi$ (Hz)	n (f(2)/f(1))
vzduch	154	28,57	1566,8	161,482	10,174026
voda	109,64	16,17	1453,439	158,626	13,2564666
5% PVA	107,15	20,226	1455,459	157,027	13,5833784
9% PVA	97,724	27,088	1449,581	167,367	14,8334186
12% PVA	neměřeno	neměřeno	1453,704	168,268	nezname
15% PVA	neměřeno	neměřeno	1447,105	184,738	nezname
glycerin	91,9521	16,824	1452,112	177,203	15,7920483
silikonový olej	89,125	19,153	1465,548	138,413	16,4437363

Tabulka B.5- První a druhá rezonanční frekvence, šířka peaku v půlce jeho výšky a poměr rezonančních frekvencí n Bimorfu 400/200/0.60-SA. Vše v závislosti na typu kapaliny

Příloha C – Tabulky s vypočítanými viskozitami pro jednotlivé typy bimorfů

Poloměr počítaný pomocí vody

Bimorf 490/018/060 SA		R vody=23,799 mm
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem vypočtené (Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,125
9% PVA	2,07	0,6976
12% PVA	4,1335	1,9268
15% PVA	30,474	9,919
glycerin	1,5065	0,503
silikonový olej	0,05*	0,0765

Tabulka C.1 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem
s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 490/018/060 SA
(Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého
CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 490/021/060 SA		R vody=25,936 mm
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,1151
9% PVA	2,07	0,5229
12% PVA	4,1335	1,8876
15% PVA	30,474	9,7326
glycerin	1,5065	0,551
silikonový olej	0,05*	0,0918

Tabulka C.2 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem
s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 490/021/060 SA
(Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého
CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 350/025/060 SA		R vody=34,658 mm
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem	η bimorfem
	(Pa·s)	(Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,1347
9% PVA	2,07	0,3663
12% PVA	4,1335	1,5005
15% PVA	30,474	7,17
glycerin	1,5065	0,2278
silikonový olej	0,05*	0,1287

Tabulka C.3 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 350/025/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 600/200/060 SA		R vody=97,788 mm
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem	η bimorfem
	(Pa·s)	(Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,1108
9% PVA	2,07	0,1235
12% PVA	4,1335	3,5042
15% PVA	30,474	6,3669
glycerin	1,5065	1,0437
silikonový olej	0,05*	1,0878

Tabulka C.4 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 600/200/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 400/200/060 SA		R vody=77,504mm
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem	η bimorfem
	(Pa·s)	(Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,0605
9% PVA	2,07	1,5966
12% PVA	4,1335	1,7603
15% PVA	30,474	7,2166
glycerin	1,5065	1,4823
silikonový olej	0,05*	0,0582

Tabulka C.5 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem
s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 400/200/060 SA
(Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí přiloženého
CD, * tabulková hodnota)

Poloměr počítaný pomocí glycerinu

Bimorf 490/018/060 SA R glycerinu=21,25 mm		
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,123
5% PVA	0,74	0,5567
9% PVA	2,07	1,803
12% PVA	4,1335	4,2014
15% PVA	30,474	17,609
glycerin	1,5065	1,5032
silikonový olej	0,05*	0,4199

Tabulka C.6 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 490/018/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 490/021/060 SA R glycerinu=23,55 mm		
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,1095
5% PVA	0,74	0,4954
9% PVA	2,07	1,3702
12% PVA	4,1335	3,8433
15% PVA	30,474	16,6366
glycerin	1,5065	1,5099
silikonový olej	0,05*	0,4265

Tabulka C.7 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 490/021/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 350/025/060 SA R glycerinu=31,33 mm		
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,3988
5% PVA	0,74	1,0837
9% PVA	2,07	1,7825
12% PVA	4,1335	4,3921
15% PVA	30,474	14,9824
glycerin	1,5065	1,5032
silikonový olej	0,05*	1,0256

Tabulka C.8 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 390/025/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 600/200/060 SA R glycerinu=96,00 mm		
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,0341
5% PVA	0,74	0,2474
9% PVA	2,07	0,2664
12% PVA	4,1335	4,3872
15% PVA	30,474	7,673
glycerin	1,5065	1,5003
silikonový olej	0,05*	1,5142

Tabulka C.9 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 600/200/060 SA (Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí příloženého CD, * tabulková hodnota)

Bimorf 400/200/060 SA R glycerinu=77,45 mm		
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem	η bimorfem
	(Pa·s)	(Pa·s)
voda	0,001*	0,0016
5% PVA	0,74	0,0645
9% PVA	2,07	1,786
12% PVA	4,1335	3,1361
15% PVA	30,474	7,2788
glycerin	1,5065	1,5073
silikonový olej	0,05*	0,0621

Tabulka C.10 - Srovnání hodnot viskozity naměřené Höpplerovým viskozimetrem
s hodnotami vypočítanými z naměřených hodnot bimorfem 400/200/060 SA
(Výpočty provedeny v programu Matlab7.1, soubor s výpočtem součástí přiloženého
CD, * tabulková hodnota)